

BRAÇ ROBÒTIC BCN3D MOVEO



CONSTRUCCIÓ, PROGRAMACIÓ I
IMPLEMENTACIÓ D'UN MODEL
DE BRAÇ ROBÒTIC
INDUSTRIAL

Autor: JouleJuggler
Departament de Tecnologia
2023-2034

AGRAÏMENTS

Vull expressar el meu sincer agraïment a la meva tutora, qui ha demostrat una atenció i un suport inigualable al llarg de tot el període de treball. La seva dedicació es reflecteix no només en proporcionar-me orientació, sinó també en recolzar cada una de les decisions que he pres durant el procés. Els seus consells han estat fonamentals per al desenvolupament d'aquest projecte, i estic realment agraït per la seva guia constant.

Igualment, vull agrair a l'Alan, que m'ha brindat coneixement i m'ha transmès la il·lusió per endinsar-se en un projecte i gaudir-lo.

Per acabar, mostrar el meu agraïment a la meva família, especialment al meu pare, a la meva mare, a la meva germana i al meu tiet, que m'han recolzat al llarg d'aquests mesos i m'han fet costat en les puntuals adversitats.

If you write the problem down clearly, then the matter is half solved.

-Kidlin's law

RESUM

L'objectiu d'aquest treball de recerca es basa en la construcció, la programació i la implementació d'un prototip de braç robòtic industrial. En primer lloc, s'ha hagut de desenvolupar un marc teòric que incorpori la informació necessària per a poder entendre el tema i així poder dur a terme el muntatge del braç. Així doncs, la part teòrica es pot dividir en dos grans blocs. Primerament, es fa una introducció dels principals components que comprèn un braç robòtic, proporcionant una visió panoràmica, per després endinsar-se en les característiques i els diversos tipus de cada component. D'altra banda, el segon bloc fa referència a la diferenciació dels diversos tipus de braços robòtics. A continuació, segueixen les característiques i especialitats de cada tipus de braç robòtic. Pel que fa al marc experimental, consta del muntatge, la programació i la implementació d'un braç robòtic, capaç de dur a terme tasques com transportar objectes, saludar o jugar al tres en ratlla. Aquesta fase pràctica representa el nucli del treball, demostrant la viabilitat i les capacitats operatives del braç robòtic desenvolupat. Les diverses funcionalitats, des de la manipulació fins a les interaccions socials destaquen la versatilitat del prototip, consolidant així les aportacions d'aquesta recerca al camp de la robòtica industrial.

ABSTRACT

The aim of this research work is focused on the construction, programming, and implementation of a prototype of an industrial robotic arm. Initially, a theoretical framework had to be developed, incorporating necessary information to understand the subject and thereby facilitate the assembly of the arm. The theoretical part is divided into two main sections. The first section introduces the main components of a robotic arm, providing an overview before delving into the characteristics and various types of each component. The second section differentiates between the various types of robotic arms, followed by the features and specialties of each type. Regarding the experimental framework, it consists of the assembly, programming, and implementation of a robotic arm capable of performing tasks such as transporting objects, waving, or playing tic-tac-toe. This practical phase represents the core of the work, demonstrating the viability and operational capabilities of the developed robotic arm. The various functionalities, from manipulation to social interactions, highlight the versatility of the prototype, thereby consolidating this research's contributions to the field of industrial robotics.

SUMARI DE CONTINGUTS

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. MOTIVACIÓ DEL TREBALL	1
1.2. OBJECTIUS	2
2. ELS BRAÇOS ROBÒTICS: MARC CONCEPTUAL	4
2.1. Definició i importància dels braços robòtics a l'automatització industrial	4
2.2. Principis de funcionament dels braços robòtics	5
2.2.1. Estructura i components d'un braç robòtic industrial	5
2.2.1.1. Les articulacions	6
2.2.1.2. Els enllaços	8
2.2.1.3. La base	8
2.2.1.4. Els actuadors	9
2.2.1.4.1. Els actuadors pneumàtics	9
2.2.1.4.2. Els actuadors hidràulics	11
2.2.1.4.3. Els actuadors magnètics	11
2.2.1.4.4. Els actuadors elèctrics	11
2.2.1.4.4.1. Actuadors lineals elèctrics	12
2.2.1.4.4.2. Actuadors rotatius elèctrics	13
2.2.1.4.4.3. Actuadors piezoelèctrics	13
2.2.1.4.5. Actuadors electromagnètics	14
2.2.1.4.5.1. Solenoides	14
2.2.1.4.5.2. Motors pas a pas	14
2.2.1.4.5.3. Relés	16
2.2.1.5. Els controladors	16
2.2.1.6. La font d'alimentació	18
2.2.1.7. La interfície de l'usuari	19
2.2.1.8. El sistema de refrigeració	19
2.2.2. Sensors emprats als braços robòtics	19
2.3. Aplicacions dels braços robòtics	21
2.3.1. Indústria manufacturera	21
2.3.2. Ús de braços robòtics en la medicina i cirurgia	22
2.3.2.1. El robot quirúrgic Da Vinci	22
2.3.2.2. Pròtesis i exosquelets robòtics	23
2.3.3. Robòtica col·laborativa: braços robòtics en entorns de treball humà-robot	23
2.4. Disseny i classificació de braços robòtics	24
2.4.1. Tipus de braços robòtics	24
2.4.2. Paràmetres de disseny: abast, càrrega útil, precisió i velocitat	25
2.4.3. Eines i accessoris acoplables als braços robòtics	26
2.5. Control dels braços robòtics	26
2.5.1. Cinemàtica	26
2.5.1.1. Cinemàtica directa	27
2.5.1.1.1. Representació Denavit-Hartenberg	27

2.5.1.2. Cinemàtica indirecta	30
3. CONSTRUCCIÓ, PROGRAMACIÓ I IMPLEMENTACIÓ D'UN BRAÇ ROBÒTIC	31
3.1. INTRODUCCIÓ A LA PART EXPERIMENTAL DEL TREBALL	31
3.2. ELS PRIMERS PASSOS	32
3.2.1. MUNTATGES PREVIS:	32
3.2.1.1. MUNTATGE 1: CONNEXIÓ I PROGRAMACIÓ DE MOTORS PAS A PAS	33
3.2.1.2. MUNTATGE 2: MONITORITZACIÓ DE 4 MOTORS PAS A PAS	34
3.2.1.3. MUNTATGE 3: CONTROL D'UN MOTOR PAS A PAS AMB EL DRIVER TB6560	35
3.2.2. BUSCANT AJUDA	36
3.2.3. LLISTA DE MATERIAL I PRESSUPOST	37
3.3. COMPONENTS	38
3.3.1. MOTORS PAS A PAS	38
3.3.1.1. NEMA 17	39
3.3.1.2. NEMA 17 + CAIXA PLANETÀRIA	39
3.3.1.3. NEMA 23	40
3.3.2. DRIVER TB6560	41
3.3.3. ARDUINO SHIELD RAMPS V1.4	42
3.3.4. ARDUINO MEGA	43
3.3.5. FONT D'ALIMENTACIÓ	43
3.4. DISSENY ELECTRÒNIC	45
3.4.1. MUNTATGE DE L'ESQUEMA	45
3.5. IMPRESSIÓ 3D	46
3.5.1. IMPRESORA 3D	46
3.5.2. MATERIAL DE FABRICACIÓ	47
3.5.2. Paràmetres i aspectes de la impressió	48
3.5.3. ESTRUCTURES DE SUPORTS	48
3.6. PROGRAMACIÓ DEL BRAÇ ROBÒTIC	49
3.6.1. FIRMWARE I PROGRAMARI	49
3.6.1.1. FIRMWARE MARLIN	49
3.6.1.2. CONTROL DEL BRAÇ ROBÒTIC MITJANÇANT UN PROJECTE WINDOWS FORMS. NET FRAMEWORK	50
3.7. MUNTATGE DEL BRAÇ	55
3.8. CONTINGUT AUDIOVISUAL DEL PROJECTE	61
4. CONCLUSIONS	63
4.1. CONCLUSIONS TEÒRIQUES	63
4.2. CONCLUSIONS PRÀCTIQUES	64
4.3. CONCLUSIONS PERSONALS	66
5 APÈNDIX	68
5.1. IA APLICADA A UN BRAÇ ROBÒTIC	68
5.1.1. INTRODUCCIÓ	68
5.1.2. ADAPTACIÓ DELS CODIS PER PODER TREBALLAR CONJUNTAMENT	68
5.1.3. RESULTATS	76
5.1.4. BRAÇ ROBÒTIC AMB SENSORS	76
5.1.4.1. TAULER	77

5.1.4.2. DISPENSADOR DE FITXES	78
5.1.4.3. COMUNICACIÓ PORT SÈRIE ARDUINO I VB	79
5.1.4.4. IMPLEMENTACIÓ DE SENSORS	81
5.1.4.5. MOVIMENTS DEL BRAÇ	83
5.1.4.6. RESULTAT FINAL	85
5.1.5. CONCLUSIONS	87
6. LLISTA DE REFERÈNCIES	88
6.1 BIBLIOGRAFIA	88
6.2. WEBGRAFIA	89
6.3. ICONOGRAFIA	93
7. ANNEXOS - GITHUB	97

1.INTRODUCCIÓ

1.1. MOTIVACIÓ DEL TREBALL

Des de la segona dècada del segle XIX, hem assistit la IV Revolució Industrial, també denominada Indústria 4.0. Aquesta revolució és impulsada per un conjunt de progressos tecnològics que han experimentat canvis profunds en la indústria i l'economia. Entre aquests avenços destaquen àmbits com la robòtica, la intel·ligència artificial, la cadena de blocs, la nanotecnologia, la impressió 3D i molts altres. Aquesta revolució tecnològica ha emergit com una força transformadora en la societat contemporània, influenciant virtualment tots els àmbits de la vida. Ha millorat la comunicació, la producció, l'educació i la salut, proporcionant innumerables avantatges i oportunitats. Malgrat això, també ha presentat reptes significatius, com l'increment de la disparitat digital i les preocupacions relatives a la pèrdua d'ocupació a causa de l'automatització i la intel·ligència artificial. El desenvolupament tecnològic representa la manifestació de la creativitat humana dirigida a la millora i la facilitació de la vida quotidiana, obrint camins cap a un futur més eficient i emocionant. Aquesta habilitat per crear noves eines i solucions actua com a motor d'una pròxima onada d'innovació i progressos.

Amb les paraules d'Alvin Toffler, "La tecnologia s'alimenta d'ella mateixa. La tecnologia fa possible més tecnologia.

L'elecció a primer de batxillerat de cursar l'assignatura de Robòtica em va despertar un gran interès sobre aquest món dedicat a la concepció, construcció, operació i aplicació de robots, entenent aquests com a màquines capaces d'executar tasques de manera autònoma. I de seguida vaig tenir molt clar que volia fer el meu treball de recerca enfocat en aquest món de la robòtica, especialment pel seu potencial de futur en tots els àmbits: industrial, salut, social, etc.

D'altra banda, també em va motivar i animar a realitzar aquest treball el fet que per a poder construir el braç robòtic havia de conèixer i aprendre diferents disciplines tècniques i vaig pensar que això em podria ser de gran ajuda per una de les decisions més important que has de prendre com estudiant: escollir el grau universitari a cursar el curs vinent. La varietat de disciplines necessàries per a la construcció d'aquest braç robòtic (mecànica, electrònica, informàtica...) permet l'aproximació a les diferents especialitats d'enginyeria, que és cap on van les meves preferències de grau universitari.

1.2. OBJECTIUS

I. L'objectiu principal d'aquest treball de recerca es la construcció, programació i implementació d'un braç robòtic industrial.

Quan es decideix que el treball se centra en els braços robòtics, es decideix fer-ne un prototip d'aquest. Es vol fer un braç amb uns paràmetres de disseny elevat, per tal que sigui més proper a un utilitzat en la indústria.

II. Investigar l'estat de la robòtica en l'actualitat i definir els conceptes claus.

Són necessaris uns coneixement bàsics de la morfologia, l'estructura i els components d'un braç robòtic per poder-ne muntar un. A més, entendre l'estat actual de la robòtica, especialment els braços robòtics, implica una valoració dels avenços tecnològics, els diversos tipus i l'ampli espectre d'aplicacions.

III. Adquirir els coneixements tècnics necessaris per poder construir el braç robòtic.

El primer pas per construir un braç robòtic se centra en disposar dels coneixements necessaris per fer-ho. Donat que els coneixements requerits per la construcció del braç robòtic BCN3D Moveo estaven en un principi molt allunyats del meu nivell, es planteja com a tercer objectiu buscar i obtenir els coneixements tècnics necessaris per a poder portar a terme la construcció del braç.

La robòtica és una disciplina que integra diverses branques de la ciència i la tecnologia, incloent-hi la mecànica, l'electrònica, la informàtica, la intel·ligència artificial, el disseny 3D, entre d'altres. El primer pas és, doncs, ampliar coneixements en totes aquestes àrees.

IV. Adaptar els recursos que es necessiten per la construcció i implementació del braç perquè el pressupost sigui el més ajustat possible.

Un cop es té clar que es vol construir un braç robòtic, el nou repte que es planteja és el de poder construir-lo amb un pressupost baix i amb uns recursos materials limitats. Per això és clau planificar la construcció del braç amb els recursos disponibles a l'institut així com buscar materials reciclats, l'adquisició de materials de segona mà, etc.

V. Control del braç robòtic

Programar una aplicació per tal de controlar el braç.

VI. Un cop construït, implementar un codi perquè el robot faci les accions necessàries per aconseguir un objectiu.

Com a darrer objectiu, però amb el mateix grau d'importància que els anteriors pel potencial de futur que pot tenir, es marca la possibilitat d'implementar aquest braç robòtic en la realització d'alguna tasca col·laborativa.

2. ELS BRAÇOS ROBÒTICS: MARC CONCEPTUAL

2.1. Definició i importància dels braços robòtics a l'automatització industrial



Un braç robòtic és una eina que simula la versatilitat de moviment d'un braç humà, per tal d'automatitzar processos, reduir temps, evitar feines dificultoses, ja siguin perilloses, pesades...

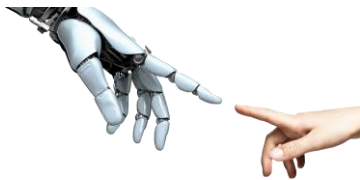
Els braços robòtics són presents en diversos camps com ara la medicina i el sector de l'agricultura; tanmateix, aquest treball es basa en la seva implementació en l'automatització industrial. Similar a un braç humà, un braç robòtic comparteix els seus dos elements bàsics: les articulacions (també conegudes com a *"joints"*¹ en anglès) i les connexions entre les articulacions (anomenades *"links"*² en anglès) permetent no sols un desplaçament transaccional (lineal) sinó també un moviment rotatori (circular). Malgrat la similitud en la seva estructura, un braç robòtic potència característiques útils, com ara velocitat, precisió, força i capacitat per assumir riscos; tenint un rendiment considerablement més elevat, convertint aquesta eina en un component essencial en la fabricació i el sector de l'automoció.

¹ La paraula *"joints"* en el context d'un braç robòtic es refereix a les articulacions o punts de connexió que permeten el moviment del braç.

² En el context d'un braç robòtic, *"links"* es refereix als segments o esclavons que componen l'estructura del braç i uneixen dues articulacions.

En plena revolució industrial, la gran demanda de productes ha causat la necessitat de millorar el rendiment de la indústria. Robots més intel·ligents, braços robòtics més potents i precisos que permeten l'automatització de processos són, cada cop, més demandats, no sols per millorar el rendiment de la producció, però també per redirigir els llocs de treball físics cap a tasques relacionades amb la presa de decisions, creativitat, desenvolupament d'idees... tasques més sofisticades que només els humans són capaços de dur a terme. Les *soft skills* (competències socials, atributs personals... que permeten a les persones desenvolupar-se adequadament en el seu entorn) comencen a mostrar-se com a necessàries. Habilitats com la creativitat, la intel·ligència emocional o l'empatia són qualitats socioemocionals les quals els robots mai seran capaços d'adquirir.

Els braços robòtics tenen avantatge respecte als humans en les tasques físiques perquè incrementen la productivitat: poden estar treballant les 24 hores del dia, proporcionant una gran flexibilitat la qual no pot ser proporcionada per un treballador, millorant la qualitat del producte, reduint l'espai de treball i la seguretat. És per això que els braços robòtics permeten augmentar la rendibilitat de les empreses.^{3 4}



Malgrat la idea equivocada que els robots en la indústria comporten la destrucció de llocs de treball, un estudi de la WEF (World Economic Forum) estima que l'automatització eliminarà 75 milions de llocs de treball cap al 2025; no obstant això, en generarà 133, tenint un balanç positiu.⁵

Il·lustració 2: cooperació entre robot-humà.

Al·legoria del quadre *La Creació d'Adam*. (L'humà dota de vida al robot)

³ Fauzi Othman. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. [En línia]. Juny 2016. <<https://www.researchgate.net/profile/Kulvir-Singh/post/Could-you-please-help-me-about-History-of-industry-40-in-Malaysia/attachment/5a5d9a084cde266d58835b28/AS%3A583311556263937%401516083720944/download/in-dustry4.0ReviewOthman.pdf>>[Consulta:16 agost 2023].

⁴ Haider A. F. Almurib , Haidar Fadhil Al-Qrimli , Nandha Kumar. A Review of Application Industrial Robotic Design. [En línia] 2011. <[A-review-of-application-industrial-robotic-design.pdf](#)>[Consulta:16 agost 2023].

⁵ World Economic Forum. *The future of jobs report*. [En línia]. 2018.<[WEF Future of Jobs 2018.pdf](https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report/) (weforum.org)>[Consulta:16 agost 2023].

2.2. Principis de funcionament dels braços robòtics

2.2.1. Estructura i components d'un braç robòtic industrial

Els braços robòtics es componen de diversos elements que treballen conjuntament per dur a terme diverses funcions, determinades per un funcionari. Es poden diferenciar dos grans components: el hardware⁶ i el software⁷.

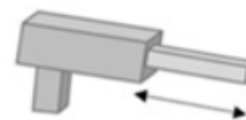
Aquest apartat se centra únicament en hardware dels braços robòtics. L'estructura d'un braç robòtic consta de diversos components que treballen junts per garantir-ne el funcionament i, conseqüentment, dur a terme diverses funcions. Els components d'un braç robòtic són: les articulacions, els enllaços, la base, els actuadors, els sensors de retroalimentació, el controlador, la font d'alimentació, l'efector final, la interfície d'usuari, l'estructura mecànica, el sistema de refrigeració, el sistema de comunicació i els diversos sensors.

2.2.1.1. Les articulacions

Les articulacions en un braç robòtic es dissenyen per a proporcionar diferents graus de llibertat al braç, permetent-lo moure en vàries direccions. A causa del fet que s'utilitzen diversos tipus de robots en la indústria, sigui per termes de moviment sigui d'aplicació, hi haurà diversos tipus de juntes (articulacions).⁸⁹

TIPUS D'ARTICULACIONS

Les **unions lineals** permeten que una part del braç es mogui en línia recta al llarg d'un eix específic. Aquest moviment pot ser horitzontal, vertical o en qualsevol altra direcció desitjada, depenent de com es configura l'articulació. Les unions lineals s'utilitzen en aplicacions on el moviment en línia recta és essencial. Això pot

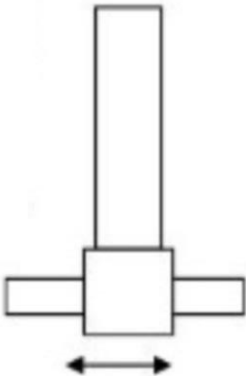


⁶ Hardware es refereix als components físics i tangibles d'una computadora o dispositiu electrònic, com la CPU, la memòria RAM, el disc dur i la pantalla.

⁷ El software són els programes i les dades que s'executen en un sistema informàtic. Inclou el sistema operatiu, aplicacions i qualsevol altre codi o programa que permeti que el hardware funcioni i realitzi tasques específiques.

⁸ MATHEUS S. XAVIER, CHARBEL D. TAWK, ALI ZOLFAGHARIAN, JOSHUA PINSKIER, DAVID HOWARD 5, TAYLOR YOUNG, JIEWEN LAI 6, SIMON M. HARRISON, YUEN K. YONG, MAHDI BODAGHI AND ANDREW J. FLEMING. Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications.. [En línia]. 9 juny 2022. <[IEEE Xplore Full-Text PDF](#)>[Consulta:22 agost 2023].

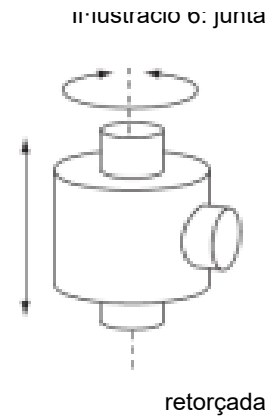
⁹ I. TRENDAFILOVA AND H. VAN BRUSSE. NON-LINEAR DYNAMICS TOOLS FOR THE MOTION ANALYSIS AND CONDITION MONITORING OF ROBOT JOINTS. [En línia]. 20 desembre 2000. <[00b4951a64e8c1c31f000000-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)>[Consulta:19 agost 2023].

incloure sistemes de transport i manipulació de materials, sistemes d'assemblatge i operacions d'inspecció que requereixen moviments precisos en línia recta.¹⁰	II·lustració 3: unió lineal
Les juntres ortogonals són una configuració especial d'articulacions en braços robòtics que es dissenyen de manera que els eixos de les articulacions es creuen entre si de forma perpendicular. Això significa que els eixos de rotació de les articulacions es tallen en angles rectes, la qual cosa proporciona un alt grau de simplicitat i precisió en el control de moviments en un espai tridimensional. Atès que les juntes ortogonals tenen eixos que es tallen en angles rectes, la cinemàtica i el control són més simples en comparació amb configuracions d'articulacions més complexes. Això facilita la programació i el control del braç robòtic. A més a més, La geometria de les juntes ortogonals pot ajudar a minimitzar la interferència entre el braç robòtic i el seu entorn, la qual cosa permet un ús eficient de l'espai i una major versatilitat en la ubicació del robot. Tanmateix, malgrat que les juntes ortogonals ofereixen precisió i simplicitat, tenen limitacions en termes de moviments complexos. Per exemple, no són adequades per a aplicacions que requereixen moviments curvilinis.	 II·lustració 4: junta ortogonal
Les juntres rotacionals són un dels tipus més comuns d'articulacions utilitzades en braços robòtics. Aquestes articulacions permeten el moviment de rotació al voltant d'un eix específic, la qual cosa permet al braç robòtic realitzar moviments angulars en diverses direccions., Igual que les articulacions d'un ésser humà permeten el moviment de flexió i extensió en diferents direccions, les juntes rotacionals en un braç robòtic permeten rotacions que possibiliten una àmplia varietat de moviments angulars.¹¹	 II·lustració 5: junta rotacional

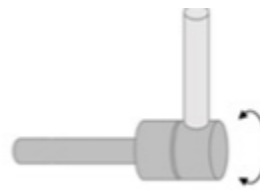
¹⁰ M. Taylan Das, L. Canan Dülger. *Mathematical modelling, simulation and experimental verification of a scara robot*. [En línia]. 18 gener 2005.<[doi:10.1016/j.simpat.2004.11.004](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2004.11.004)>[Consulta:19 agost 2023].

¹¹ Jamshed Iqbal, Raza ul Islam, and Hamza Khan . *Modeling and Analysis of a 6 DOF Robotic Arm Manipulator* . [En línia]. 6 juny 2012.<[Microsoft Word - EEE-1207-02](#)>[Consulta:19 agost 2023].

Les **junts retorçades**, també conegudes com a juntes de torsió o juntes helicoidals, són un tipus especialitzat d'articulació que s'utilitza en braços robòtics per proporcionar moviments de torsió o rotació sobre un eix helicoidal. A diferència de les juntes rotacionals convencionals que permeten la rotació al voltant d'un eix fix, les juntes retorçades permeten que una part del braç robòtic es reforça en un patró helicoidal a mesura que es mou al llarg del seu eix. Les juntes retorçades s'empren en aplicacions on el moviment de torsió és essencial. Alguns exemples inclouen la dispensació precisa de líquids, la realització de sutures en cirurgia robòtica, la manipulació d'objectes que requereixen un gir precís o la barreja de substàncies en laboratori.



Les **articulacions giratòries** compten amb un moviment de rotació que és útil en diferents aplicacions. El moviment d'aquestes articulacions es caracteritza pel moviment entre els dos esglaons. L'eix de l'enllaç d'entrada està dissenyat per ser paral·lel a l'eix de rotació de l'articulació. D'altra banda, l'eix de l'enllaç de sortida està dissenyat per ser perpendicular a l'eix de rotació de l'articulació. Aquest tipus de junta també es coneix com a junta Tipus V.



2.2.1.2. Els enllaços

La part que uneix les articulacions d'un braç robòtic es denomina comunament "enllaços" ("links", en anglès). Aquests enllaços són crucials per donar-li al braç la seva forma, longitud i mobilitat, i poden variar en mida, forma i material segons l'aplicació específica i el disseny del robot.

Els enllaços poden ser de diversos tipus: alguns exemples comuns inclouen enllaços rígids, esglaons articulats (que poden flexionar-se), enllaços telescòpics (que es poden estendre i contraure) i enllaços flexibles (que es poden doblegar).¹²

Els enllaços solen estar fets de materials poc pesats però resistents, com alumini, acer inoxidable o materials compostos. L'elecció del material depèn de factors com la càrrega útil que el braç ha de suportar i la necessitat de mantenir un pes lleuger per facilitar el moviment. El disseny d'aquests també afecta el pes total del braç robòtic i, consegüentment, el seu centre de gravetat. Un disseny acurat pot ajudar a optimitzar l'equilibri i l'estabilitat del robot.

¹² B. V. Chapnik, G. R. Heppler, and J.D. Aplevich . *Modeling Impact on a One-Link Flexible Robotic Arm*. [En línia]. agost 1991. <[Modelling-Impact-on-a-One-Link-Flexible-Robotic-Arm.pdf](#)>[Consulta:19 agost 2023].

2.2.1.3. La base

La base és una part fonamental de l'estructura d'un braç robòtic, ja que li proporciona estabilitat, ja que s'ancora a terra o a una superfície de treball. A part de la funció estructural, els actuadors i mecanismes necessaris per moure la primera articulació normalment se situen a sobre.

2.2.1.4. Els actuadors

Els actuadors són els que proporcionen moviment al braç. Els braços robòtics utilitzen diversos actuadors, siguin pneumàtics, hidràulics, magnètics o elèctrics, depenent de l'ús del braç.

2.2.1.4.1. Els actuadors pneumàtics

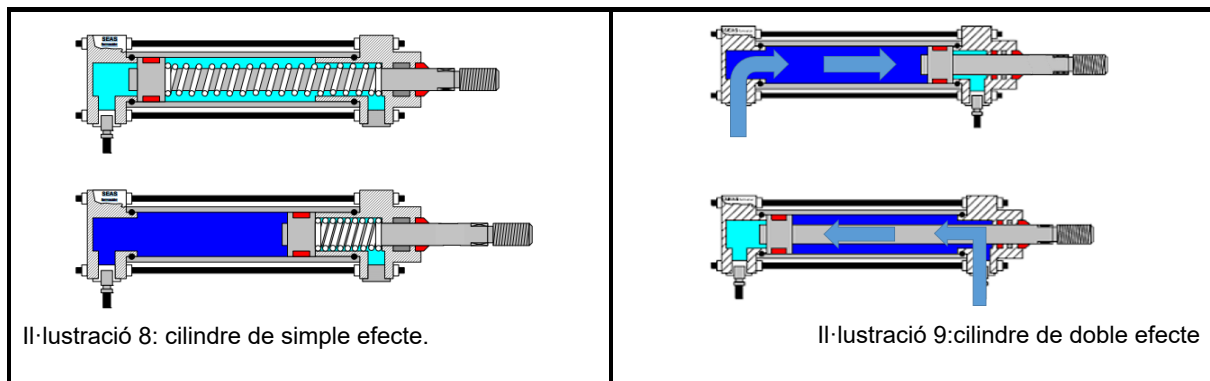
Els actuadors pneumàtics funcionen mitjançant gas a pressió, sovint aire comprimit, que entra en una cambra, on el gas acumula pressió. Quan ha acumulat prou pressió en contrast amb la pressió atmosfèrica exterior, provoca un moviment cinètic controlat a través d'un dispositiu com ara un pistó o un engranatge. Aquest moviment resultant pot ser rotatori (actuadors de gir limitat i motors pneumàtics) o lineal (cilindres de simple i doble efecte), normalment duent a terme tasques com ara empènyer, estirar, agafar, girar, obrir, tancar, subjectar, aturar, estampar...¹³ Fàcils de mantenir, aquests actuadors poden funcionar a altes velocitats, proporcionant una gran flexibilitat a l'hora de dur a terme una àmplia varietat de funcions.

ACTUADORS PNEUMÀTICS DE MOVIMENT RESULTANT LINEAL

Els **cilindres de simple efecte** tenen com a característica principal que el moviment té un únic sentit, és a dir, fan el treball en una sola carrera de cicle. El retrocés del pistó es produeix a l'evacuar l'aire comprimit de la part posterior. Aquests actuadors s'empren normalment en feines de desplaçaments curts.

Els **cilindres de doble efecte** són capaços de produir treball útil en els dos sentits, ja que disposen d'una força activa no només en l'avanç, sinó que també en el retrocés. És per aquest motiu que posseeixen moltes més aplicacions que els cilindres de simple efecte.

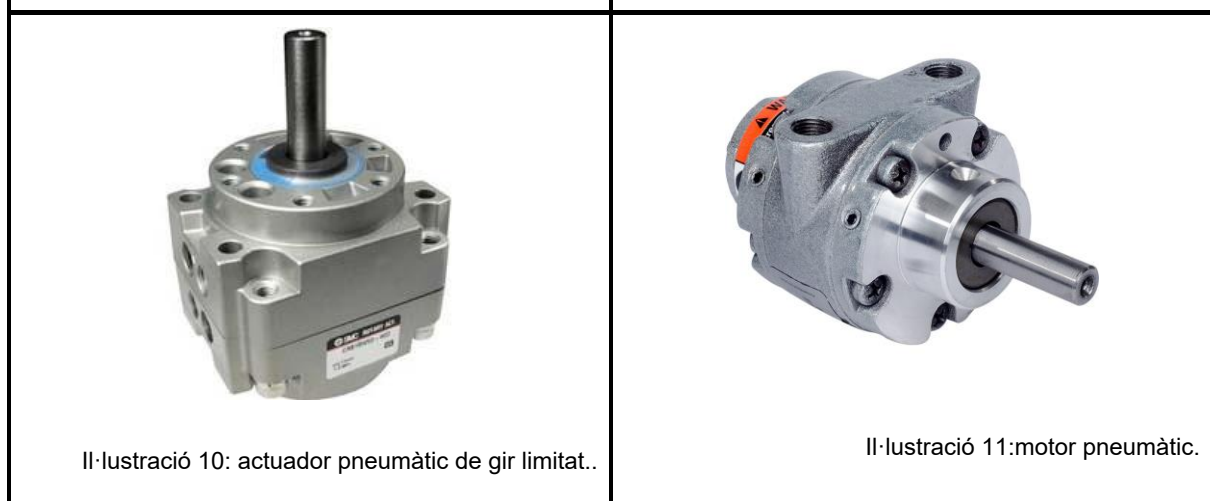
¹³ Manuel Jesús Escalera Tornero Antonio José Rodríguez Fernández. ACTUADORES NEUMÁTICOS. [En línia]. <[Manuel Jesus Esacalera-Antonio Rodriguez-Actuadores Neumaticos 1-libre.pdf](#)>[Consulta:22 agost 2023].



ACTUADORS PNEUMÀTICS DE MOVIMENT RESULTANT ROTATORI

Els **actuadors pneumàtics de gir limitat** són aquells que proporcionen moviment de gir, però no arriben a produir una revolució completa. Aquests actuadors poden fer un gir màxim de 270 graus i són utilitzats per girar components, actuar vàlvules de control de processos i girs en aplicacions de robòtica.

Els **motors pneumàtics** són comunament utilitzats en la indústria a causa del seu baix cost, la seva mida, la seva potència i el baix cost de manteniment; un motor robust conegut per la seva alta resistència en relació amb el pes (high power-to-weight ratio). Malgrat això, els principals inconvenients d'aquest tipus de motor és la poca precisió, causada per l'aire a pressió i la sortida d'aquest per la vàlvula, el baix rendiment en comparació amb un motor elèctric i la necessitat d'una potent infraestructura d'aire comprimit.¹⁴



¹⁴ Dan Stoianovici, Alexandru Patriciu, Doru Petrisor, Dumitru Mazilu and Louis Kavoussi. A New Type of Motor: Pneumatic Step Motor. [En línia]. 26 abril 2011. <[A New Type of Motor: Pneumatic Step Motor - PMC \(nih.gov\)](#)>.[Consulta:22 agost 2023].

Segons l'opinió de Hazem I. Ali, Samsul Bahari B Mohd Noor, S. M. Bashi, M. H. Marhaban en la ressenya A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control) publicat el 2009, La decisió final sobre el millor tipus i configuració de disseny per a l'actuador pneumàtic només es pot prendre en relació amb els requisits d'una aplicació particular. L'actuador pneumàtic ha estat sovint del tipus cilindre de pistó a causa del seu baix cost i simplicitat.¹⁵

2.2.1.4.2. Els actuadors hidràulics

Els actuadors hidràulics funcionen mitjançant fluids i pressions (normalment oli). Aquests dispositius són essencials en aplicacions on es necessita una gran força i precisió en el moviment, com podria ser el cas de maquinària pesant, vehicles industrials, equips de construcció... A més de presentar altes potències, posseeix un alt rang de moviment, d'una resposta de major freqüència i, si es compara amb un sistema pneumàtic del mateix grandària, l'hidràulic produirà més força. Malgrat això, els actuadors hidràulics necessiten unes instal·lacions més elaborades que consten de sistemes de refrigeració, unitats de control de distribució, filtratge de partícules i eliminació d'aire.¹⁶

El funcionament és exactament igual al d'un actuador pneumàtic, l'única diferència és el fluid utilitzat.

2.2.1.4.3. Els actuadors magnètics

Segons Alexandru Forrai en la ressenya A robust control approach to electromagnetic act (2013), en la indústria d'alta precisió, els actuadors electromagnètics són àmpliament utilitzats a causa de la seva estructura senzilla, característiques de força favorables i baixos costos de fabricació.¹⁷

Els actuadors magnètics són dispositius que converteixen l'energia magnètica en moviment mecànic. En altres paraules, són dispositius que utilitzen camps magnètics per generar força i moviment. Els actuadors magnètics són open-loop unstable, és a dir, només poden estar oberts o tancats, no existeix un terme mitjà (0 - 1).

2.2.1.4.4. Els actuadors elèctrics

Els actuadors elèctrics converteixen energia elèctrica en energia cinètica. Els actuadors elèctrics es divideixen en diverses categories segons el seu disseny i funcionament: actuadors lineals elèctrics, actuadors rotatius elèctrics, actuadors piezoelèctrics i actuadors electromagnètics.

¹⁵ Hazem I. Ali, Samsul Bahari B Mohd Noor, S. M. Bashi, M. H. Marhaban. A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control). [En línia]. 2009. <[document \(psu.edu\)](#)>.[Consulta:22 agost 2023].

¹⁶ Antonio Delgado Díez. ACTUADORES HIDRÁULICOS. [En línia]. <[Microsoft Word - PORTADA \(uhu.es\)](#)>.[Consulta:23 agost 2023].

¹⁷ Alexandru Forrai. A robust control approach to electromagnetic act. [En línia]. 2013. <[A-robust-control-approach-to-electromagnetic-actuators.pdf \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:23 agost 2023].

2.2.1.4.4.1. Actuadors lineals elèctrics

Els actuadors lineals elèctrics generen un moviment rectilini en una única direcció mitjançant diferents mecanismes¹⁸:

Per a produir el moviment una rosca es fa girar per tal que avanci, provocant un moviment lineal a mesura que la rosca avança al llarg de l'eix. Això permet un moviment controlat de la posició i la velocitat. (Les rosques s'empren quan es busca una alta precisió, amb moviments més suaus i eficients). També es poden utilitzar corretges dentades amb les politges respectives, on la corretja es desplaça per politges accionades per un motor elèctric. La fricció entre ambdós elements crea un moviment rectilini.

Altres actuadors elèctrics lineals fan servir camps magnètics per generar moviment lineal, com els actuadors lineals de levitació magnètica. Per aixecar l'objecte, fan ús d'imants amb polaritats adequadament configurades per tal de generar una força de repulsió que contraresti la força gravitatòria.

Les principals característiques que comporten els actuadors lineals són la seva precisió, el seu control i retroalimentació (normalment solen estar equipats amb sensors, com *encoders*¹⁹, per proporcionar informació sobre la posició), la força que poden generar i la càrrega que poden suportar i finalment la seva velocitat ajustable.

¹⁸ Edrey D. Ruiz-Rojas, J.L. Vazquez-Gonzalez, Ruben Alejos-Palomares, Apolo Z. Escudero-Urbe, J. Rafael Mendoza-Vázquez. Mathematical Model of a Linear Electric Actuator with Prosthesis Applications. [En línia]. 2008. <[Mathematical Model of a Linear Electric Actuator with Prosthesis Applications \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/312511111)>.[Consulta:24 agost 2023].

¹⁹ dispositiu electromagnètic o elèctric que s'empra per mesurar la posició, la velocitat i direcció d'un objecte. Converteix el desplaçament en una senyal elèctrica que pot ser interpretada per un controlador.

2.2.1.4.4.2. Actuadors rotatius elèctrics

Un actuador rotatiu elèctric funciona transformant l'energia elèctrica en moviment rotatiu. Consta de les següents parts: motor elèctric, reductor de velocitat (opcional), eix de sortida, controlador electrònic i realimentació de posició.

El cor d'un actuador rotatiu elèctric és un motor elèctric, ja siguin de corrent continu (DC) o corrent altern (AC). Aquest és el component que transforma l'energia elèctrica en mecànica. Molts actuadors rotatius elèctrics consten d'un reductor de velocitat i parell. El més comú és una caixa de canvi planetària (*planetary gearbox*)^{20 21}.



Il·lustració 12: reductor de caixa planetària.

La rotació del motor es transfereix a l'eix de sortida, sent la part de l'actuador que gira. Aquesta va connectada al reductor (a l'engranatge solar). Per tal de controlar la velocitat i la posició de l'actuador es necessita un controlador electrònic, ja sigui un microcontrolador, un PLC (Controlador Lògic Programable) o qualsevol altre tipus de controlador. En molts actuadors rotatius elèctrics s'implementen sistemes de retroalimentació, com ara encoders o potenciòmetres, per tal de corregir i garantir que l'actuador es mou a les característiques desitjades.

2.2.1.4.4.3. Actuadors piezoelèctrics

Un actuador piezoelèctric és un dispositiu que utilitza l'efecte piezoelèctric per generar moviment mecànic com a resposta a un senyal elèctric. L'efecte piezoelèctric és una propietat de certs materials que es deformen quan se'ls aplica un camp elèctric o generen un camp elèctric quan se'ls aplica una deformació mecànica. Els actuadors piezoelèctrics s'usen en una varietat d'aplicacions que requereixen moviments precisos i ràpids.²²

²⁰ Una engranatge planetari és un tipus especial de mecanisme d'engranatge que consta de tres components principals: un engranatge solar (o sol), un o més engranatges planetaris (o satèl·lits) i un engranatge anular (o corona). Aquests components interactuen per transmetre moviment i parell en aplicacions on es necessita una relació de velocitat variable o inversa.

²¹ Yaguo Lei, Jing Lin, Ming J. Zuo, Zhengjia He. Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review. [En línia]. 21 novembre 2013. <[Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:26 agost 2023].

²² Y.J.S. Harrison. Piezoelectric Polymers [En línia]. desembre 2001. <[20020044745.pdf \(nasa.gov\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

2.2.1.4.5. Actuadors electromagnètics

Els actuadors electromagnètics utilitzen camps magnètics generats per corrent elèctric per generar moviment mecànic. N'existeixen de diferents tipus: solenoides, steppers i relés.

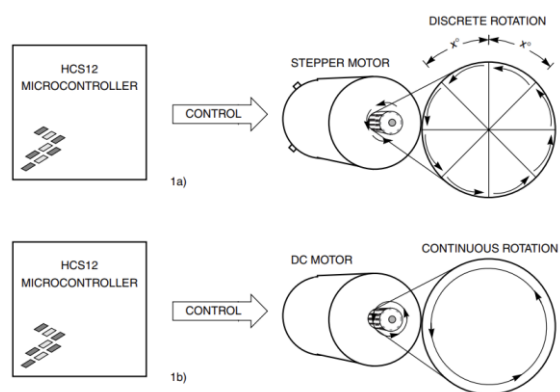
2.2.1.4.5.1. Solenoides

Un solenoide²³ és qualsevol dispositiu físic capaç de crear un camp magnètic summament uniforme i intens al seu interior, i molt feble a l'exterior. Un exemple teòric és el d'una bobina de fil conductor aïllat i enrotllat helicoidalment, de longitud indeterminada. Existeixen solenoides lineals, rotatius, proporcional, de tracció, d'empenta, de tipus biestable, de tipus monoestable i de tipus latching.

2.2.1.4.5.2. Motors pas a pas

Segons Ioana Ionică, Mircea Modreanu, Alexandru Morega, Cristian Boboc en Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor.(2017), comenten que els motors pas a pas van ser utilitzats per primer cop en servomecanismes a principis de la dècada dels trenta. Avui dia, la demanda cap a les aplicacions de control de moviment ha augmentat i els motors pas a pas juguen un paper clau en una àmplia gamma d'aplicacions que requereixen precisió i repetibilitat.²⁴

Un motor pas a pas és un motor que crea rotació a partir de corrent elèctric conduït al motor. Físicament, els motors pas a pas poden ser grans, però sovint són prou petits per ser impulsats amb corrent de l'ordre del mil·liampere. A l'aplicar polsos de corrent es genera una rotació discreta de l'eix del motor. Es diferencia d'un motor de corrent continu perquè no exhibeix una rotació contínua. Tot i que és possible impulsar un motor pas a pas de manera que tingui una rotació gairebé contínua, fer-ho requereix una major habilitat en la forma d'ona d'entrada que impulsa el motor pas a pas. La Figura 13 il·lustra algunes diferències bàsiques en la rotació del motor pas a pas i el motor de corrent continu.²⁵



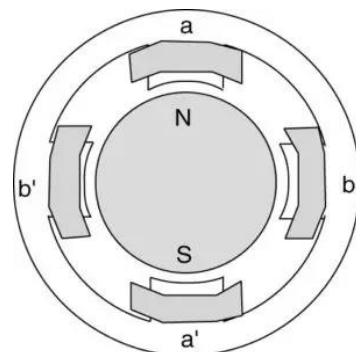
²³ prové del grec «σωλην» (sōlēm) tub o conducte i del sufix grec «oide», de l'arrel «ειδος» (eidōs) que indica en forma de.

²⁴ Ioana Ionică, Mircea Modreanu, Alexandru Morega, Cristian Boboc. Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor. [En línia]. 25 març 2017. <[untitled \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

²⁵ Matthew Grant. Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor. [En línia]. juny 2005. <[AN2974. Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor - Application Notes \(patarnott.com\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

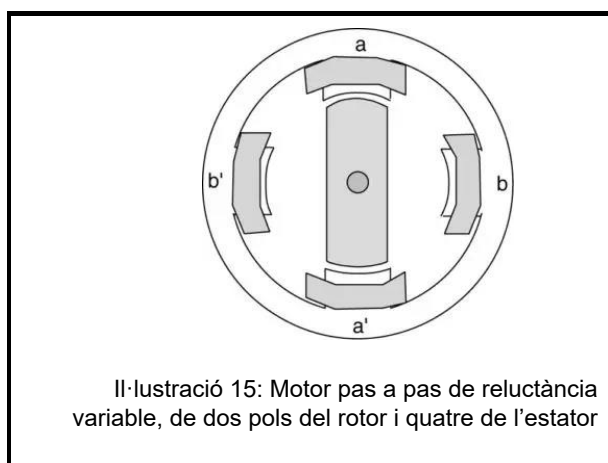
Els motors pas a pas operen mitjançant passos. Aquests passos són increments lleugers (que corresponen a un angle determinat). Per això, els motors pas a pas són coneguts per la seva precisió de posicionament. Hi ha diversos tipus de motors pas a pas: unipolars, bipolars i híbrids.

Un **motor pas a pas unipolar** (o d'imat permanent) utilitza un sol debanat (bobinat) per fase i, en lloc de tenir un rotor amb imants permanents, té un rotor amb imants solts que estan separats per segments de ferro dolç. Perquè el motor es mogui en passos, s'aplica una seqüència específica de corrent als debanats de l'estator. Aquesta seqüència d'encesa fa que els imants solts del rotor s'alineen amb els camps magnètics generats pels debanats, la qual cosa provoca que el rotor faci un pas.²⁶

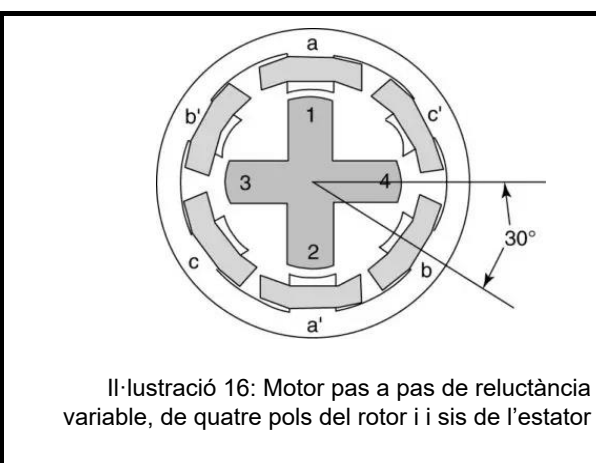


II·lustració 14: Motor pas a pas d'imat permanent

Un **motor pas a pas bipolar** (o de reluctància variable) funciona igual que un unipolar, però utilitza 2 debanats en comptes d'un i el seu rotor no té imants permanents, sinó que està construït amb un material ferromagnètic i té dents o pols que interactuen amb els camps magnètics creats pel debanat de l'estator. Un dels debanats es connecta a una font de corrent continu (DC), mentre que l'altre es connecta en sentit contrari (polaritat oposada). Per consegüent, si s'inverteix la polaritat del corrent en els debanats, es canvia la direcció de gir. Per tant, hi ha dues connexions per fase. És per això, que tenen una eficiència i potència major en comparació amb els motors pas a pas unipolars.²⁷



II·lustració 15: Motor pas a pas de reluctància variable, de dos pols del rotor i quatre de l'estator

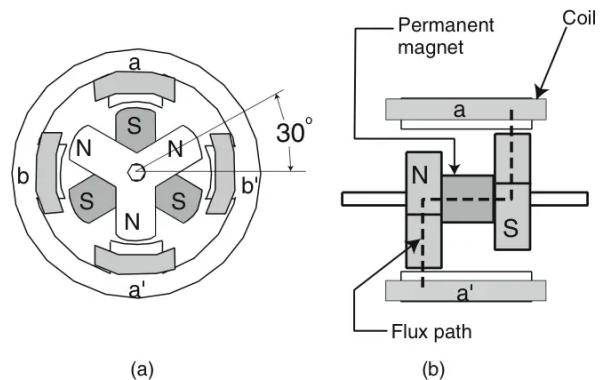


II·lustració 16: Motor pas a pas de reluctància variable, de quatre pols del rotor i sis de l'estator

²⁶ Dr. Douglas W. Jones. Stepping Motors Fundamentals. [En línia]. 2004. <[Stepping Motors Fundamentals \(bristolwatch.com\)](http://bristolwatch.com/Stepping_Motors_Fundamentals)>.[Consulta:27 agost 2023].

²⁷ ibídem.

Un **motor pas a pas híbrid** combina les característiques dels dos tipus de motors estudiats anteriorment: els unipolars i els bipolars. El disseny del motor comporta imants permanents, similar a un motor unipolar, però també té dents en el rotor, com els bipolars; per a una major resolució i un rendiment més elevat. Gràcies a aquesta combinació en la seva estructura, els motors híbrids posseeixen la versatilitat d'actuar amb més velocitat (mitjançant els imants permanents) i amb més precisió (mitjançant les dents del rotor).²⁸



Il·lustració 17: Motor pas a pas híbrid.

2.2.1.4.5.3. Relés

Un actuator **relé** és un dispositiu que controla el flux de corrent en un circuit elèctric²⁹. Bàsicament, actua com un interruptor electrònic (en relació amb la funció, no a la seva construcció). El relé es compon d'una bobina connectada al corrent. Quan la bobina s'activa, produeix un camp electromagnètic que fa que el contacte del relé que està normalment obert o normalment tancat (depèn de com es configuri) s'obri o es tanqui permetent l'entrada de corrent o tallant-la. Donat que el relé té la capacitat de controlar un circuit de sortida de major potència que el d'entrada, es pot considerar com un amplificador elèctric.

2.2.1.5. Els controladors

El controlador és la part que gestiona, dirigeix o regula el funcionament d'un sistema, procés o màquina (fent el símil amb un cos humà, n'és el cervell).

Existeixen diferents tipus de controladors associats cadascun a una tasca específica, com ara: microcontroladors, microprocessadors, controladors basats en FPGA, controladors industrials, controladors de robots col·laboratius...

Els **microcontroladors** són controladors simples que, a causa de la seva baixa complexitat, s'utilitzen en l'educació, per culpa de la seva baixa complexitat. Se solen programar en llenguatge C o Arduino IDE. L'exemple més conegut de microcontrolador és Arduino.

²⁸ Ioana Ionică, Mircea Modreanu, Alexandru Morega, Cristian Boboc. Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor. [En línia]. 25 març 2017. <[untitled \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/315111111)>.[Consulta:27 agost 2023].

²⁹ Arturo Pérez París. RELÉS ELECTROMAGNÉTICOS Y ELECTRÓNICOS. PARTE II: INTERRUPTOR ELECTRÓNICO. [En línia]. desembre 2010. <<https://www.vivatacademia.net/index.php/vivat/article/view/371>>.[Consulta:28 agost 2023].



Arduino és una plataforma de desenvolupament electrònic de codi obert que combina maquinari i programari flexibles i accessibles. Dissenyada per a artistes, dissenyadors i entusiastes, facilita la creació d'objectes interactius i entorns. Arduino és capaç de percebre el seu entorn en rebre entrades de diversos sensors i d'influir-hi mitjançant el control de dispositius com ara llums i motors. La programació del microcontrolador de la placa es realitza utilitzant el Llenguatge de Programació Arduino (basat en *Wiring*³⁰) i l'Entorn de Desenvolupament Arduino (basat en Processing³¹). Els projectes d'Arduino poden funcionar de manera autònoma o establir comunicació amb programari en execució en un ordinador, per exemple, mitjançant Flash, Processing, MaxMSP, entre d'altres.³²

Els **microprocessadors** o CPU (Unitat Central de Processament) són més potents i sofisticats; són utilitzats en robots o màquines més avançades que necessiten executar tasques més complexes. Aquest tipus de processadors executen sistemes operatius complexos, com Linux.³³

Els **controladors basats en FPGAs** (*Field-Programmable Gate Arrays*) s'utilitzen en la robòtica per tasques de control de temps real i processament de senyals. És un dispositiu semiconductor que conté blocs de lògica que pot ser programada *in situ*. La lògica programable pot reproduir funcions senzilles (com una porta lògica) o sistemes complexos.³⁴

Els **controladors industrials** s'utilitzen en aplicacions de robòtica industrial per gestionar braços robòtics, manipuladors i sistemes d'automatització. D'aquesta manera un controlador industrial pot definir-se com tot sistema o equip tecnològic que facilita una automatització

³⁰ Anglisme per referir-se al cablejat elèctric.

³¹ Llenguatge de programació i entorn de desenvolupament integrat (IDE).

³² Rafael Enríquez Herrador. Guía de Usuario de Arduino. [En línia]. 13 novembre 2009. <[Arduino_user_manual_es.pdf \(uco.es\)](#)>. [Consulta:29 agost 2023].

³³ Paul E. Gronowski, Member, IEEE, William J. Bowhill, Member, IEEE, Ronald P. Preston, Member, IEEE, Michael K. Gowan, and Randy L. Allmon, Associate Member, IEEE. High-Performance Microprocessor Design. [En línia]. 5 maig 1998. <[High-performance microprocessor design \(iczhiku.com\)](#)>. [Consulta:29 agost 2023].

³⁴ Steven D. Johnson. Field Programmable Gate Array. [En línia]. 11 novembre 2004. <[fpga.pdf \(indiana.edu\)](#)>. [Consulta:29 agost 2023].

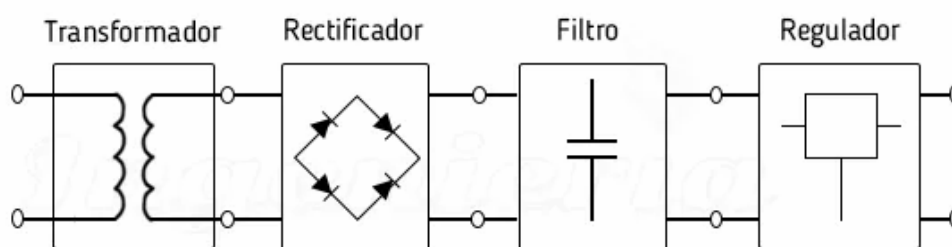
dels processos productius en moltes indústries i empreses. N'existeixen de diversos tipus, com ara PLC, DCS, PACs...

2.2.1.6. La font d'alimentació

La font d'alimentació és el dispositiu que subministra energia elèctrica a una màquina.

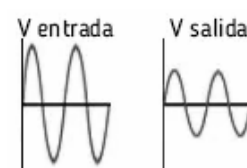
La font d'alimentació pot variar depenent del tipus i mida de robot, és a dir, depenent dels seus requisits elèctrics. Les fonts d'alimentació poden ser de corrent continu o altern, depenent de la funcionalitat i el disseny de cada robot; tanmateix, les fonts de corrent continu són les més utilitzades. És important que la font d'alimentació proporcioni una tensió estable, per tal de garantir un funcionament precís i segur.

El funcionament de les fonts d'alimentació consten de quatre passos: transformació, rectificació, filtrat i regulació.³⁵

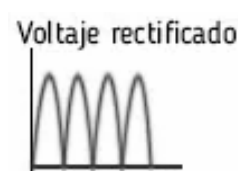


II·lustració 20: Fases d'una font d'alimentació

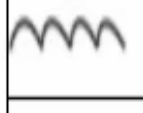
L'etapa de transformació, tal com el seu nom indica, redueix el nivell de voltatge de l'energia alterna de la xarxa mitjançant un camp magnètic (la reducció de voltatge es du a terme mitjançant un transformador format per un debanat primari i un altre, o altres, de secundaris).



L'etapa de rectificació es basa a rectificar el senyal que prové dels debanats secundaris mitjançant díodes rectificadors. N'existeixen de dos tipus, de mitja ona i d'ona completa.



³⁵Electrocomponentes SA.Fuentes de alimentación. [En línia].<[Microsoft PowerPoint - Fuentes de alimentacion.ppt \(sase.com.ar\)](https://www.sase.com.ar/microsoft-powerpoint-fuentes-de-alimentacion.ppt)>.[Consulta:30 agost 2023].

L'etapa de filtratge es basa a convertir el corrent altern en continu, utilitzant capacitors que es carreguen en el valor màxim de voltatge i es descarreguen lentament quan el senyal polsant desapareix.	Voltaje filtrado 
L'etapa de regulació té com a única funció mantenir constants les característiques del sistema. Es poden emprar reguladors lineals o de commutació (<i>switching</i>).	Voltaje final 

2.2.1.7. La interfície de l'usuari

La Interfície de l'usuari o RUI (Robot User Interface) és la plataforma a través de la qual l'usuari interactua amb la màquina per controlar-lo, supervisar-lo i rebre informació.

Hi ha diversos tipus d'interfase de l'usuari, com ara: pantalles gràfiques, panells de control, controls remots, realitat virtual o augmentada...

2.2.1.8. El sistema de refrigeració

El sistema de refrigeració és essencial per garantir que tots els seus components funcionin dins dels rangs de temperatura adequats, clau pel seu rendiment i durabilitat. Existeixen diversos tipus de sistemes de refrigeració, com ara: ventilació natural, ventiladors, líquids refrigerants, dissipadors de calor, disseny tèrmic...

2.2.2. Sensors emprats als braços robòtics

Un sensor és un component dissenyat per detectar canvis o estímuls de l'entorn i convertir-los en senyals elèctrics, digitals o analògiques per poder processar-les. Els sensors tenen diverses fases: detecció, conversió, transmissió de dades i processament.

Els sensors s'empren per millorar o augmentar l'eficàcia dels mecanismes de percepció i comunicació de l'home. Existeix una gran varietat de sensors usats en els braços robòtics. Els sensors en els braços robòtics poden variar depenent de les seves característiques i aplicacions, però els més utilitzats són: els encorder (ja explicats anteriorment), els sensors de força, els sensors de proximitat, càmeres i sensors de visió, sensors inercials, sensors de temperatura, magnètics...

Sensors de força: s'utilitzen per quantificar la magnitud d'una força (ja sigui aplicada en la direcció del sensor o en el sentit oposat). El sensor està compost d'un element sensible en el seu interior que es deforma quan se li aplica una força. Aquesta deformació es converteix en un senyal elèctric.



Il·lustració 25: Sensor de força

Sensors de proximitat: detecten presència o proximitat d'un objecte sense la necessitat del contacte físic, mitjançant tecnologies com ara infrarojos (IR), ultrasons, làser, detecció de camp magnètic... Els infrarojos emeten un infraroig, quan aquest xoca amb algun objecte rebota i un receptor (fotodíode, fototransistor o detectors d'infraroig) infraroigs detecta infraroig que retorna. La variació d'intensitat de la radiació de l'infraroig rebuda pel receptor és inversament proporcional a la distància entre el sensor i l'objecte.



Il·lustració 26: Sensor d'ultrasons

Sensors de visió: dispositius que processen i analitzen imatges i vídeos d'objectes i entorns. Utilitzen càmeres digitals per capturar imatges i seqüències de vídeo, que posteriorment són processades per un software especialitzat que ho analitza.



Il·lustració 27: Sensor de visió

Sensors inercials: s'utilitzen per mesurar l'acceleració, la velocitat angular i l'orientació d'un cos. Estan formats per diversos components: acceleròmetres, giroscopis, GPS, magnetòmetres...



Il·lustració 28: Sensor inercial

Els sensors de temperatura mesuren i monitoren la temperatura d'un entorn específic. Els sensors de temperatura comporten uns paràmetres específics, com



Il·lustració 29: Sensor de temperatura

ara la sensibilitat, el rang de valors, la precisió, la resolució, el temps de resposta i l'offset ^{36, 37}	
--	--

2.3. Aplicacions dels braços robòtics

2.3.1. Indústria manufacturera

La indústria manufacturera³⁸ se centra en la transformació de béns primaris o semi processats en béns finals de consum.³⁹ L'ús de braços robòtics, així com d'altres tipus de robots, en la indústria manufacturera reemplaça la mà d'obra humana per màquines més potents i amb major rendiment de tasques físiques, com ara el transport d'assemblatges, embalatges... millorant processos repetibles de gran volum



Il·lustració 30: fàbrica Seat

En aquest sentit, un estudi de la consultora *Information and Communication Technology (ICT) Market Research* assenyalava que el volum de negoci d'aquests dispositius passarà de 18.900 milions de dòlars fins a 39.000 milions el 2024, la qual cosa suposa un creixement del 206%.

2.3.2. Ús de braços robòtics en la medicina i cirurgia

El seu ús és cada cop més freqüent en la medicina, proporcionant o millorant solucions a problemes que fins ara no tenien una solució o no havia estat contemplada. La medicina i les noves tecnologies, quan van juntes, avancen a una velocitat estratosfèrica.

Els braços robòtics proporcionen l'augment de la capacitat de la manipulació humana, augmentant la precisió del posicionament d'instruments, disminuint moviments imperceptibles, com ara tremolors i altres errors humans, incorporant ajudes informàtiques en el procés, la capacitat de poder treballar a distància...

³⁶ anglicisme que es refereix a un ajust o correcció aplicat al valor mesurat per compensar qualsevol desviació o error sistemàtic en la lectura.

³⁷ Luis del Valle Hernández. Escoger el mejor sensor de temperatura para Arduino. [En línia]. 26 juny 2019.. <<https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/SensoresTemArdui.pdf>>.[Consulta:3 stembre 2023].

³⁸ La paraula manufactura prové del llatí, manus significa "mà" i faça significa "fer", és a dir, es tracta de béns elaborats de forma manual.

³⁹Tadeusz Mikolajczyk. Manufacturing Using Robot. [En línia]. 10 febrer 2012. <[Manufacturing-Using-Robot.pdf \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/260141111_Manufacturing_Using_Robot)>.[Consulta:8 stembre 2023].

Existeixen diferents tipus de robots (braços robòtics en la medicina) com ara: el robot quirúrgic Da Vinci o les pròtesis i els exosquelets robòtics, entre altres.⁴⁰

2.3.2.1. El robot quirúrgic Da Vinci

El robot quirúrgic Da Vinci és el sistema quirúrgic més avançat del món, oferint una màxima seguretat cap al pacient. El braç es compon per una consola per al cirurgià, 4 braços robòtics, un sistema de visualització d'alta resolució i els instruments propis d'una operació quirúrgica. El sistema rep les ordres a temps real, reproduint els moviments de la mà, el canell i els dits del cirurgià en qüestió.

S'han dut a terme nombrosos estudis sobre l'eficàcia d'aquest robot en comparació a les operacions humanes. Segons un article que estudia l'eficàcia, la seguretat i l'eficiència de la cirurgia robòtica amb el sistema quirúrgic Da Vinci aplicat a l'obesitat, el càncer de pròstata i el càncer de colera, els resultats són els següents: «L'únic resultat favorable a la cirurgia robòtica en les cirurgies revisades va ser la durada de l'estada hospitalària en la gastrectomia vertical. No s'han observat diferències estadísticament significatives en la resta de variables estudiades.»⁴¹



Il·lustració 31: robot quirúrgic Da Vinci.

2.3.2.2. Pròtesis i exosquelets robòtics

Una pròtesis és una extensió artificial que substitueix una part del cos, i d'aquí el terme biónica.⁴²

⁴⁰ Madileth Yolanda Chancay Merchán, María Magdalena Tóala Zambrano, María Mercedes Ortiz Hernández, Edwin Antonio Mero Lino. La robòtica y sus avances en la medicina. [En línia]. 2022. <<https://revistas.unesum.edu.ec/JTI/index.php/JTI/article/view/8>>.[Consulta:6 stembre 2023].

⁴¹ Ministerio de Sanidad, Generalitat de Catalunya, Salut/, Agència de Qualitat i Avaluació Sanitàries de Catalunya, Red Española De Agencias De Evaluación. Eficacia, efectividad, seguridad y eficiencia de la cirugía robótica con el sistema quirúrgico Da Vinci. [En línia]. <[Eficacia, efectividad, seguridad y eficiencia de la cirugía robótica con el sistema quirúrgico Da Vinci. Aplicada a la obesidad \(cirugía bariátrica\), cáncer prostático y cáncer colorrectal \(gencat.cat\)](#)>.[Consulta:6 stembre 2023].

⁴² LisandroPuglisi y HéctorMoreno.Prótesis robóticas. [En línia]. <[Protesis robóticas-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)>.[Consulta:6 stembre 2023].

La **biònica** és, d'acord amb una definició donada el 1960 per Jack Steele⁴³, de la U.S. Air Force, l'anàlisi del funcionament real dels sistemes vius i, un cop descoberts els seus secrets, materialitzar-los en aparells.

Existeixen diferents tipus de pròtesis mecàniques, com ara: pròtesis extremitats, pròtesis controlades pel cervell, pròtesis mioelèctriques, pròtesis biòniques, pròtesis de mans i dits...

La investigació en el camp de les pròtesis robòtiques continua avançant, la qual cosa porta a millores constants en termes de funcionalitat, comoditat i naturalitat en el moviment.

2.3.3. Robòtica col·laborativa: braços robòtics en entorns de treball humà-robot

La robòtica col·laborativa són sistemes fàcils de controlar i programar que treballen juntament amb operadors sense la necessitat d'utilitzar elements de seguretat, com ara barreres o gàbies. A més, són equipats amb sensors de força, entre altres, capaços de detectar als operaris i autodesconnectar-se per evitar colpejar-los.

Els robots col·laboratius s'han desenvolupat d'una manera extremadament ràpida i exitosa. Aquesta tecnologia emergent representa, actualment, el segment de major creixement de la robòtica industrial, sobretot amb l'arribada de la indústria 4.0. Gràcies a la implementació d'aquests robots, les empreses han obtingut molts beneficis, com ara: estalvi de temps i major seguretat pels usuaris.

No obstant això, malgrat que sembla que la robòtica col·laborativa és una branca nova dins la robòtica, no és així. El primer robot col·laboratiu de la història va ser inventat l'any 1996 pels professors J. Edward Colgate y Michael Peshkin. Poc després, en el nou mil·lenni⁴⁴, es va establir el terme cobot, sent escollit com una de les paraules del demà pel Wall Street Journal.⁴⁵

2.4. Disseny i classificació de braços robòtics

2.4.1. Tipus de braços robòtics

Existeix una gran varietat de tipus de braços robòtics, cadascun especialitzat per optimitzar determinades tasques. Els diferents tipus de braços robòtics són: braç articulat, robot col·laboratiu, SCARA, cartesià, cilíndric, esfèric/polar i antropomòrfic.

⁴³ Jack E. Steele (27 de gener de 1924 - 19 de gener de 2009) va ser un metge estatunidenc i coronel retirat de la Força Aèria dels Estats Units, més conegut per encunyar la paraula biònica.

⁴⁴ El nou mil·lenni va ser el terme emprat en la dècada de 1990 per descriure l'arribada del segle XXI i el III mil·lenni.

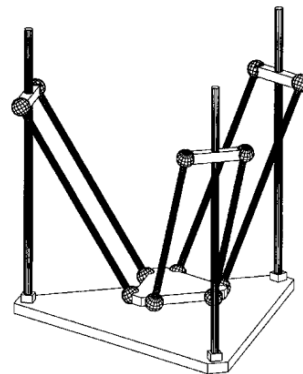
⁴⁵ Cobots: Robots for collaboration with people. [En línia]. <[Cobot - collaborative robot \(northwestern.edu\)](http://Cobot-collaborative-robot(northwestern.edu))>.[Consulta:7 stembre 2023].

Braços articulats: es componen de 5 o més graus de llibertat. Aquests cobreixen la gamma més àmplia de tipus de robots utilitzats en la indústria.



Il·lustració 32: Braç articulat BCN3D Moveo

Braços robòtics Delta: Compost per braços paral·lels connectats a una plataforma comuna. Són extremadament ràpids i precisos, ideals per a tasques com l'assemblatge de components electrònics o la manipulació d'aliments.



Il·lustració 33: Robot delta amb actuadors lineals.

SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm): braç robòtic que es caracteritza per la seva estructura articulada de dos segments que permeten un moviment en el pla horitzontal (permet moure's en un pla XY). A diferència d'altres tipus de robot industrial, els SCARA no posseeixen articulació del canell.⁴⁶

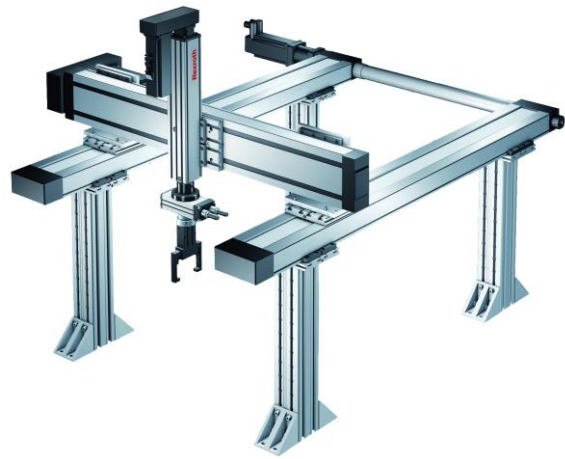


Il·lustració 34: Braç robòtic SCARA KUKA

Cartesiàns: es caracteritzen pel seu disseny i moviment tridimensional (XYZ). El moviment d'un robot cartesià es realitza (normalment) a través de moviments lineals de cadascun dels eixos. Els braços robòtics cilíndrics es caracteritzen pel seu disseny de braç en forma cilíndrica i moviment. Aquesta forma permet al braç la realització de moviments circulars i rotatius al voltant d'un

⁴⁶ Morteza Shariatee, Alireza Akbarzadeh, Ali Mousavi, and Salman Alimardani. Design of an Economical SCARA Robot for Industrial Applications. [En línia]. 2014. <[untitled \(psu.edu\)](https://www.researchgate.net/publication/312511111)>. [Consulta: 30 agost 2023].

eix central. Els braços robòtics esfèrics o polars es diferencien dels altres per moure's utilitzant un sistema de coordenades esfèriques per definir la posició i orientar-se en l'espai. Fa servir 3 coordenades: la distància radial (r), l'angle d'inclinació (θ) i l'angle de gir (φ). Els braços robòtics antropomorfs es caracteritzen per imitar l'estructura i moviment d'un braç humà (copiant als ossos i músculs d'un braç humà units per articulacions rotatives).



Il·lustració 35: Braç robòtic de tipus Cartesià

2.4.2. Paràmetres de disseny: abast, càrrega útil, precisió i velocitat

El disseny d'un braç robòtic implica una sèrie de paràmetres necessaris per determinar la seva funcionalitat amb el màxim rendiment possible. Aquests paràmetres són variables, i consten de l'abast, la càrrega útil, la precisió, la velocitat, l'acceleració...

L'**abast** d'un braç robòtic es refereix a la longitud màxima que pot estendre's per dur a terme tasques. Aquest paràmetre es veu directament influït per la longitud dels enllaços del braç, el nombre de graus de llibertat, el tipus d'articulacions i el medi o obstacles físics, com ara parets, objectes... que restringeixen el moviment del braç.

La **càrrega útil** és el pes que el braç robòtic pot aixecar. Aquest paràmetre es veu directament influït per la longitud dels enllaços del braç, el tipus d'articulacions emprades, el control i el software, i, per descomptat, els paràmetres de seguretat.

La **precisió** fa referència a la capacitat del braç robòtic a executar moviments i tasques amb una alta exactitud i repetibilitat. Mentre que l'exactitud es refereix a quan el resultat de la tasca és molt pròxim al desitjat, la repetibilitat es basa a tenir la mateixa precisió en un procés repetitiu varies vegades. Un dels paràmetres clau dins de la precisió és la tolerància a errors sistemàtics: desviacions predictibles i consistents en el rendiment del braç.

La **velocitat** es refereix a rapidesa en la qual el braç robòtic pot moure's al llarg de la seva trajectòria per a realitzar una tasca. La precisió i la velocitat són paràmetres inversament proporcionals, és a dir, si es busca precisió en un braç robòtic, la velocitat serà reduïda, i a l'invers.

2.4.3. Eines i accessoris acoplables als braços robòtics

La darrera i última part del braç robòtic (end-part) és l'eina que efectua la tasca. Aquesta eina (o accessori) és variable, i depèn de la funcionalitat o l'objectiu que té el braç robòtic. És per això que en la indústria s'utilitzen les següents eines: pinces, ventoses, pistoles de pintura, eines de soldadura, perforadora, serres, fresadores... canyons d'aigua a pressió, càmeres de visió, sensors de precisió...⁴⁷



Il·lustració 36: robot Kuka

L'eina de la pinya, o gripper, és la que més popular entre els braços robòtics. També és coneix amb com eina EOAT (acrònim en anglès de End Of Arm Tooling). Aquestes eines simulen els moviments d'una mà humana i són la part que connecten la peça en qüestió amb el braç. N'existeixen de diversos tipus: pinces de dos dits, de tres dits, pinces amb dits flexibles, pinces del vuit, grippers de forma de bola flexible...

2.5. Control dels braços robòtics

2.5.1. Cinemàtica

La cinemàtica d'un robot se centra a analitzar la posició, velocitat i acceleració dels seus elements sense considerar les forces que causen el moviment, deixant de costat la dinàmica del robot. Per determinar la velocitat, calculem la derivada de la posició respecte al temps, mentre que l'acceleració s'obté calculant la derivada de la velocitat respecte al temps.

Una eina essencial per analitzar el moviment del robot és la resolució del problema de cinemàtica del seu braç articulat. Això es pot aconseguir mitjançant dos models: el model cinemàtic directe i el model cinemàtic invers. A més, hi ha diversos mètodes per resoldre aquests models cinemàtics, com el mètode geomètric, l'ús de matrius de transformació entre sistemes de referència o la transformació de coordenades. L'elecció del mètode depèn del nombre de graus de llibertat i si s'utilitza el model directe o invers, la qual cosa afecta la complexitat de la resolució.⁴⁸

⁴⁷ Rogelio Delgado. Herramientas finales en robótica industrial. [En línia]. 15 octubre 2018. <[En robotica industrial conocer distintas herramientas finales disponibles \(inesem.es\)](https://www.inesem.es/robotica-industrial-conocer-distintas-herramientas-finales-disponibles)>.[Consulta:10 stembre 2023].

⁴⁸ Juan Ignacio Medrano Trujillo. Brazo robot de bajo coste con motores paso a paso que escribe. [En línia]. 2020. <<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/94547/TFG-2757-MEDRANO%20TRUJILLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.[Consulta: 6 novembre 2023].

2.5.1.1. Cinemàtica directa

La cinemàtica directa tracta d'establir la posició i orientació de l'extrem final del robot amb relació a un sistema de coordenades pres com a referència, utilitzant la informació dels valors de les articulacions i els paràmetres geomètrics dels elements del robot.

És a dir, la posició de l'extrem final del robot (el gripper) s'obté de concatenar les rotacions de cada element.

2.5.1.1.1. Representació Denavit-Hartenberg

La representació Denavit-Hartenberg (DH) és un mètode utilitzat en robòtica per descriure la geometria i cinemàtica d'un sistema mecànic articulat, com ara un braç robòtic. Va ser desenvolupat per Jacques Denavit i Richard S. Hartenberg i proporciona una manera sistemàtica de descriure les relacions geomètriques i cinemàtiques entre els esglais consecutius d'un braç robòtic.

PARÀMETRES DE LA REPRESENTACIÓ DENAVIT-HARTENBERG
Longitud (a): La longitud de l'esglai, mesurada al llarg de l'eix comú de rotació entre els esglais.
Angle de Gir (α): L'angle de rotació entre els eixos de dos esglais consecutius, mesurat al voltant de l'eix comú de rotació.

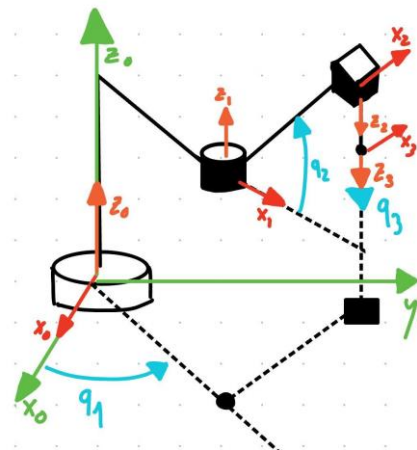
Distància (d): La distància al llarg de l'eix comú de rotació entre els sistemes de referència de dos esglais consecutius, mesurada perpendicularment al pla comú de rotació.

Angle d'Inclinació (θ): L'angle de rotació al voltant de l'eix comú de rotació entre els sistemes de referència de dos esglais consecutius, mesurat en la direcció de l'eix de desplaçament.

Aquests paràmetres s'utilitzen per construir les matrius de transformació homogènia que representen la relació entre els sistemes de referència dels esglais consecutius. En multiplicar aquestes matrius, s'obté una matriu de transformació total que descriu la posició i orientació de l'extrem del braç robòtic en funció de les variables articulades.

EXEMPLE DE LA REPRESENTACIÓ DENAVIT-HARTENBERG D'UN BRAÇ ROBÒTIC DE 3 GRAUS DE LLIBERTAT

(UN BRAÇ ROBÒTIC DE TIPUS SCARA)



Il·lustració 37: representació Denavit-Hartenberg d'un braç SCARA

$$\begin{aligned} T_{(i-1)/i} &= Rot_z(\theta_i) Trans_z(d_i) Trans_x(a_i) Rot_x(\alpha_i) \\ &= Rot_z(\theta_i) Trans_{x,y,z}(a_i, 0, d_i) Rot_x(\alpha_i) \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Il·lustració 38: formació de la matriu Denavit-Hartenberg

	θ_{ix}	d_{ix}	a_{iz}	α_{iz}
1	$0+q_1$	L1	L2	0
2	$0+q_2$	0	L3	π
3	0	$0+q_3$	0	0

$$H3 = H1 * H2 * H3$$

$$\begin{pmatrix} \cos(q1) & -\sin(q1) & 0 & L2 \cdot \cos(q1) \\ \sin(q1) & \cos(q1) & 0 & L2 \cdot \sin(q1) \\ 0 & 0 & 1 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(q2) & \sin(q2) & 0 & L3 \cdot \cos(q2) \\ \sin(q2) & -\cos(q2) & 0 & L3 \cdot \sin(q2) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos(q1 + q2) & \sin(q1 + q2) & 0 & L2 \cdot \cos(q1) + L3 \cdot \cos(q1 + q2) \\ \sin(q1 + q2) & -\cos(q1 + q2) & 0 & L2 \cdot \sin(q1) + L3 \cdot \sin(q1 + q2) \\ 0 & 0 & 1 & L1 - q3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} Px &= L2 \cdot \cos(q1) + L3 \cdot \cos(q1 + q2) \\ Py &= L2 \cdot \sin(q1) + L3 \cdot \sin(q1 + q2) \\ Pz &= L1 - q3 \end{aligned}$$

2.5.1.2. Cinemàtica indirecta

La cinemàtica inversa en un braç robòtic es refereix al procés de determinar les posicions i orientacions de les articulacions del braç robòtic per aconseguir una posició i orientació específiques de l'extrem de l'efector (l'eina o extrem del braç robòtic). En altres paraules, donat un punt a l'espai tridimensional al qual es vol arribar, la cinemàtica inversa calcula els angles i les posicions de les articulacions necessaris per assolir aquest punt.

La cinemàtica inversa d'un braç robòtic sol implicar la resolució d'un conjunt d'equacions matemàtiques que descriuen la relació entre les variables d'articulació i les coordenades espacials de l'efector final. La complexitat d'aquestes equacions depèn de la geometria i el tipus d'articulacions del braç robòtic.

3. CONSTRUCCIÓ, PROGRAMACIÓ I IMPLEMENTACIÓ D'UN BRAÇ ROBÒTIC

3.1. INTRODUCCIÓ A LA PART EXPERIMENTAL DEL TREBALL

Després de portar a terme la part teòrica i conceptual sobre els braços robòtics, en aquesta segona part del treball em centraré a descriure la part pràctica i experimental dedicada a la construcció, programació i implementació d'un braç robòtic industrial (objectiu principal del treball).

Així doncs, en la part experimental del treball vaig decidir construir una rèplica d'un braç robòtic usat en la indústria. L'estructura del braç robòtic està dissenyada i impresa en 3D i està controlat pel software d'Arduino.

El primer pas va ser fer un cerca per trobar diferents models de braç robòtic. La major part d'aquest tipus d'automatismes tenen diversos inconvenients, com ara la manca de potència i precisió i la seva senzillesa. Un dels models, el **BCN3D Moveo** destacava respecte a la resta: el BCN3D Moveo és un braç *open source*⁴⁹ d'alta complexitat i baix cost que s'adequa més amb un robot industrial. A més, un altre avantatge del braç és la versatilitat de camps

⁴⁹ Anglisme per referir-se a un software de codi públic

tecnològics que toca: mecànica, electrònica, programació i disseny 3D. Així que vaig optar per la construcció d'aquest model.

El BCN3D MOVEO és un prototip de braç robòtic dissenyat per l'empresa BCN3D Technologies en col·laboració amb el Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya.

BCN3D Technologies és una empresa amb seu a Barcelona que és reconeguda com un dels principals desenvolupadors i fabricants de solucions 3D a escala mundial. La seva missió principal és habilitar creadors i innovadors per fer realitat les seves idees, oferint una plataforma dedicada a la creació. Entre els seus clients més destacats es troben empreses i institucions com Nissan, BMW, la NASA, Camper, Louis Vuitton i l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT).

Una de les preocupacions del Departament d'Ensenyament és l'elevat cost dels materials que han d'usar els alumnes de formació de grau superior per realitzar les seves pràctiques. En aquest sentit, un braç robòtic *Open Source*, modificable pels alumnes i reproduïble a baix cost podria copiar varis dels itineraris formatius existents: Disseny mecànic, automatismes, programació industrial, etc.

Així doncs, el BCN3D Moveo hauria de permetre als centres educatius gaudir d'un equipament personalitzable, modificable i de fàcil accés per a l'alumne a un preu lluny dels equipaments industrials que normalment havien hagut d'adquirir però amb unes prestacions suficients per a les finalitats formatives.

3.2. ELS PRIMERS PASSOS

3.2.1. MUNTATGES PREVIS:

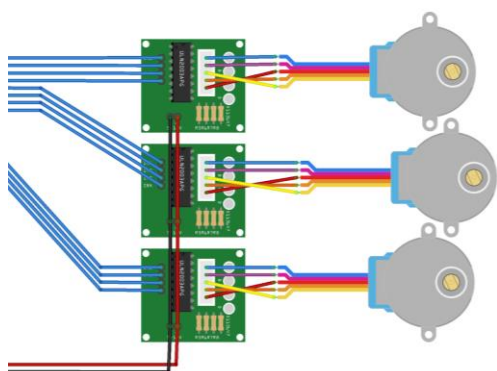
Abans de començar amb la construcció d'un braç robòtic, he fet una sèrie de muntatges per entendre el funcionament dels principals components.

3.2.1.1. MUNTATGE 1: CONNEXIÓ I PROGRAMACIÓ DE MOTORS PAS A PAS

El primer muntatge es va centrar en els motors pas a pas. Què és un motor pas a pas, com funciona, com es programa i quan s'utilitza foren unes de les principals preguntes. Per tal de resoldre-les, vaig decidir aprendre a programar un dels motor pas a pas més simples del mercat amb el seu driver corresponent: el motor pas a pas 28BYJ-48 amb el driver ULN2003 i, posteriorment, amb el driver L298N.

El següent objectiu va ser connectar 3 motors pas a pas amb una corrent externa, ja que els 5V no eren suficients. Es va utilitzar una pila de 9V i un mòdul de subministrament de corrent. Cada motor tenia assignat un nom i es movien mitjançant l'input al monitor sèrie. S'utilitzava la llibreria <Stepper.h> per accionar els motors.

MUNTATGE ELÈCTRIC:



Il·lustració 39: esquema de la connexió de 3 28BYJ-48 amb els seus drivers L298N corresponents.

CODI:



S'utilitza la galeria stepper per fer accionar els 3 motors. Des del port sèrie s'introdueix el nom del motor que es vol fer accionar (A, B o C) i el número de pasos.

incluir llibreria stepper:

```
#include <Stepper.h>
```

lectura del port sèrie i guardada en una variable:

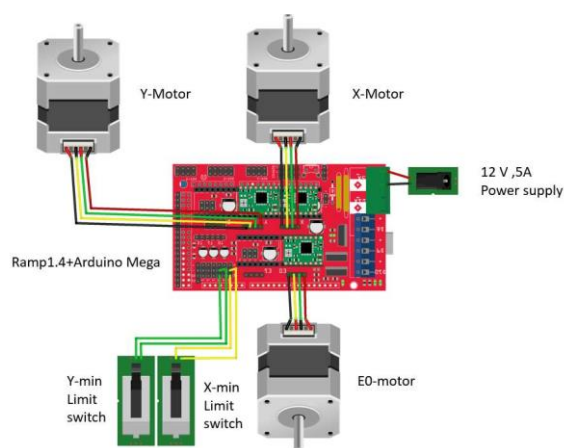
```
String comando =  
Serial.readStringUntil('\n');
```

L'objectiu principal d'aquesta pràctica era aprendre a utilitzar una font d'alimentació externa per suplir la demanda de corrent dels motors pas a pas i escriure un programa per poder accionar-los individualment tots 3.

3.2.1.2. MUNTATGE 2: MONITORITZACIÓ DE 4 MOTORS PAS A PAS

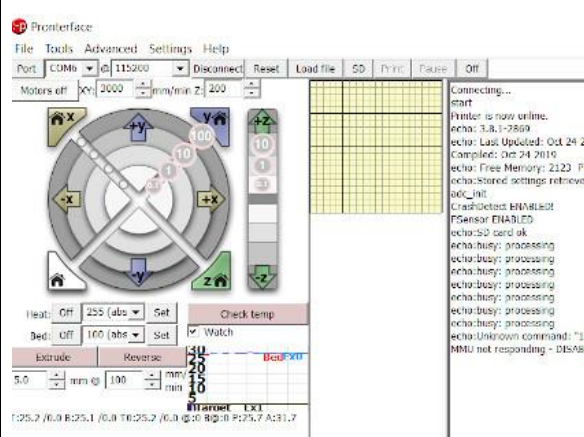
La segona pràctica va consistir a accionar 4 motors pas a pas amb Pronterface, una aplicació en la qual pots monitorar i enviar comandos als teus motors (normalment 'utilitza en el comandament d'una impressora 3D). Es van connectar 4 Nema 17 a una Shield CNC V3 amb els drivers A4988, amb una font d'alimentació externa de 24V. Per tal d'accionar els motors, es va pujar el firmware Marlin i, posteriorment, es va connectar a Pronterface.

MUNTATGE ELÈCTRIC:



Il·lustració 40: esquema de connexió de tres motors pas a pas Nema 17 a la Shield CNC V3 amb els drivers A4988.

PRONTERFACE:



Il·lustració 41: Aplicació pronterface

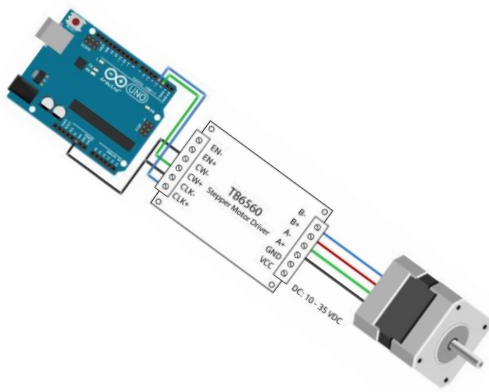
Inicialment, es va pujar el firmware GRBL a la ramps; tanmateix, el firmware GRBL i Pronterface no són compatibles. És per això que es va decidir utilitzar una altra aplicació per accionar els motors: Universal GCode Sender. Aquesta aplicació no va funcionar, no era compatible amb Windows 11, i en provar-ho no funcionava, però no hi havia cap problema. És per això que es va suposar que el problema no estava ni en el muntatge, ni en l'aplicació, sinó que era culpa del firmware grbl.

Per tal de tirar endavant amb la pràctica, es va pujar i configurar el firmware Marlin. Al connectar la placa al Pronterface, no va haver-hi cap problema.

3.2.1.3. MUNTATGE 3: CONTROL D'UN MOTOR PAS A PAS AMB EL DRIVER TB6560

La darrera i última pràctica va consistir en accionar tots els motors individualment mitjançant el driver TB6560 per verificar i aprendre que i com funcionaven. Es van connectar individualment amb un corrent extern de 12V. El codi es basava en accionar el motor en els dos sentits de gir. En el programa, s'utilitzava la llibreria <AccelStepper.h>

MUNTATGE ELÈCTRIC:



Il·lustració 42: esquema de connexió d'un Nema 17 amb el driver TB6560.

CODI:



S'utilitza la galeria Acceltepper per fer accionar els motor. El motor s'acciona en els dos sentits sense parar.

incluir llibreria Accelstepper:

```
#include <AccelStepper.h>
```

moure el motor en els dos sentits

```
stepper.moveTo(8000);
```

```
stepper.moveTo(0)
```

L'objectiu principal d'aquesta pràctica era verificar que els motors funcionessin correctament, ja que es van comprar de segona mà. A més, vaig aprendre a utilitzar el driver TB6560 i configurar-lo amb les característiques d'un motor pas a pas (Nema 17 o 23).

3.2.2. BUSCANT AJUDA

Un dels principals inconvenients en fer la construcció i posada marxa d'aquest robot, era la manca de coneixements tècnics que tenia. Per això vaig decidir buscar ajuda a través de la xarxa. Em vaig posar en contacte amb una llista d'universitats, centres de recerca i inclús particulars que havien implementat aquest model.

Finalment, vaig tenir resposta: el Sr. Alan Abad, tècnic superior en robòtica i automàtica industrial, i molt aficionat a la robòtica que va respondre molt amablement a la meva crida. Gràcies a ell he pogut resoldre alguns dubtes complexos i importants, així com m'ha proporcionat peces i material difícil de trobar a baix cost i inclús he pogut compartir amb ell consells i recomanacions a l'hora de muntar el braç.



Il·lustració 44: L'Alan i jo.

3.2.3. LLISTA DE MATERIAL I PRESSUPOST

Com s'ha comentat anteriorment, un dels principals objectius d'aquest projecte és la construcció d'un braç robòtic amb el mínim pressupost possible. El pressupost per la construcció d'un braç robòtic no baixava d'alguns milers d'euros. És per això que es va decidir començar el projecte del BCN3D Moveo, el qual preveia un pressupost uncial de 400€ aproximadament. Encara que amb l'objectiu de reduir-ne més el cost, hem buscat i reciclat diversos components sempre que ha estat possible.

	BOM ID	BOM	QUANTITAT	PRESSUPOST INICIAL
Components	1	Stepper Motor SM42HT47-1684 1,8º step, 1,6 A, 3600 g·cm	1	6€
	2	ARDUINO MEGA 2560	1	11.2€
	3	Stepper Driver tb6560	6	20.79€
	4	Power Supply 24V 320W	1	
	5	RAMPS V1.4	1	6.19€
	6	Power converter 24V a 12V	1	
	7	Servo Motor 180º 55G TORQUE=13KG/CM	1	5.33€
	8	Gear Ratio 5:1 Planetary Gearbox Nema 17 Stepper 17HS19-1684S-PG5 (step 0,35º , 2Nm, 1,68A)	1	19.79€
	9	Nema 23, 112mm, Ø8mm flat shaft SM57HT112-3004A, step 1,8º, 3A, 28Kg·cm	2	12€
	10	Stepper Motor SM35HT36-1004A, 1,8º step, 1A, 1400g·cm	1	6€
	11	Stepper Motor nema 17 SM42HT33-1334, 1,8º step, 1,33A, 2200 g·cm	1	6€
	12	Chrome steel smooth bar-134mm	1	1.6€
	13	Chrome steel smooth bar-114mm	1	1.6€
	14	Chrome steel smooth bar-80mm	1	1.6€
	15	Ball Bearing 608ZZ 8mm x 22mm x 7mm	10	3.7€
	16	Ball Bearing 625ZZ 5mm x 16mm x 5mm	8	3.7€
	17	Ball Bearing 624ZZ 4mm x 13mm x 5mm	9	3.7€
	18	Ball Bearing 623ZZ 3mm x 10mm x 4mm	3	3.7€
	19	Brass insert M4	3	2.41€
	20	Brass insert M3	20	0.49€
	21	Pulley T5, Bore 8mm, 14 tooth, 17mm width	3	imprès
	22	Pulley T5, Bore 5mm, 10 tooth, 17 mm width	2	imprès
	23	ROD BAR M8 L 42mm	1	2.27€
	24	ZCOUPLING STEEL 5 TO 8 mm rigid	1	1.06€
	25	Axial Fan DC 24V 80x80mm	1	
	26	Axial Fan DC 24V 50x50mm	1	X
	27	Power supply cable IEC 1,8m	1	

	28	Cable USB 2.0 AM/BM 1,8m	1	
	29	Cable Ties	10	
	30	Selfoil bearing 5mm x 8mm x 10mm	8	X
	31	Selfoil bearing 8mm x 12mm x 20mm	2	X
	32	Wood Base - 550mm x 550mm x 16mm	1	
	33	Breco belt T5, 16mm width, L 180cm	1,8 m	
PLA			2kg	50€
Fasteners				10€ + 

PRESSUPOST INICIAL: 180€

TOTAL: 261.50€

La shield Ramps V1.3 (comprada a Aliexpress) va sortir defectuosa **(+10€)**. Un dels transistors va sortir danyat i no feia contacte, fet que va provocar que l'eix X i Y del braç no funcionessin.

No es va poder aprofitar la base de fusta **(+12€)**. La fusta reciclada era d'un gruix massa prim, i no aguantava el pes del braç.

Es va haver d'imprimir una peça (2M1) a últims moments en una empresa externa **(+40€)** per culpa d'una ruptura provocada per un mal disseny de la peça.

extres **(+20€)**

La despesa total va elevar-se 82€ del pressupost inicial. (un 45,6% més del previst).

Tanmateix, partint del pressupost mitjà d'altres usuaris que havien muntat el mateix braç amb una despesa total de 400€ aproximadament, he construït el mateix braç un 53% més econòmic.

3.3. COMPONENTS

3.3.1. MOTORS PAS A PAS

NEMA correspon a l'Associació Nacional de Fabricants Electrònics o *National Electrical Manufacturers Association*. Aquesta associació s'encarrega de realitzar estàndards industrials aplicats al camp de l'electricitat, principalment encapsulats.⁵⁰

Els motors que s'han utilitzat en el projecte no són exactament els mateixos que els especificats en el projecte original, respecte a les especificacions, el rendiment, les característiques tècniques del producte, així com el material, la mida...

Per tal d'economitzar el braç robòtic que es presenta en aquest projecte, 5 dels motors pas a pas es van comprar de segona mà, assumint que no serien exactament els mateixos que es necessitaven en el projecte inicial (BCN3D Moveo). És per això que s'han dut a terme algunes remodelacions en el disseny de les peces, així com la configuració dels drivers, amb l'objectiu que poguessin encaixar i obtenir el màxim rendiment possible.

3.3.1.1. NEMA 17

NEMA 17 fa referència a un motor pas a pas amb un encapsulat de 1.7 x 1.7 polzades d'àrea transversal. El número 17 ve d'aquesta àrea del motor, on es requereix que sigui estandarditzada, ja que és d'on solen enroscar els motors. La longitud d'aquests pot variar depenent de diversos factors com el corrent o el torque.⁵¹

Els 3 motors emprats en el projecte són els Nema 17 TYPE 103H5210-4741, de 2.5 A, 1.8°, del fabricant SANYO DENKI. No es pot proporcionar la *datasheet* (les característiques) perquè els motors es van comprar segona mà i l'antic propietari no disposava del full de dades ni està penjat a la Intranet del fabricant.

Els 3 Nema 17 utilitzats en aquest projecte són més potents en comparació amb els utilitzats en el projecte inicial. No obstant això, són de la mateixa mida (excepte un, s'ha fet una remodelació de les peces 3M2 i 3M2C). A més són unipolars (5 o 6 sortides, en el cas dels motors usats 6), mentre que els motors utilitzats en el projecte inicial són bipolars (4 sortides).



⁵⁰ <https://hetpro-store.com/nema-17/#:~:text=En%20el%20caso%20particular%2C%20el,se%20suelen%20atornillar%20los%20motores.>

⁵¹ ibídem.

Tanmateix, un motor unipolar pot treballar com a bipolar connectant únicament les sortides 1-3-4-6.

Il·lustració 45: Nema 17.

3.3.1.2. NEMA 17 + CAIXA PLANETÀRIA

El Gear Ratio 5:1 Planetary Gearbox Nema 17 Stepper 17HS19-1684S-PG5 (step $0,35^\circ$, 2 Nm, 1,68A) no està disponible actualment, així que s'ha substituït per un de similar: Motor pas a pas 42BYG, 40 mm de longitud corporal amb relació 5,18: 1 - 139:1, NEMA17, engranatge planetari, motor pas a pas amb caixa de canvis.

És exactament igual a un motor pas a pas Nema 17 amb l'única diferència que incorpora un reductor planetari de velocitat de 5.18:1.



Il·lustració 46: Nema 17 + caixa planetària.

3.3.1.3. NEMA 23

NEMA 23, fa referència a un motor pas a pas amb un encapsulat de 2.3 x 2.3 polzades d'àrea transversal. El número 23 ve d'aquesta àrea del motor, on es requereix que sigui estandarditzada, ja que és d'on solen enroscar els motors. La longitud d'aquests pot variar depenent de diversos factors com el corrent o el torque."⁵²

Els 2 motors emprats en el projecte són els Nema 23 TYPE 103H7123-4144, de 6 A, 1.8° , del fabricant SANYO DENKI. No es pot proporcionar la *datasheet* (les característiques), ja que els motors es van comprar de segona mà i l'antic propietari no disposava del full de dades ni està penjat a la Intranet del fabricant.



⁵² ibídem.

Els 2 Nema 23 utilitzats en el projecte són més potents en comparació amb els utilitzats en el projecte inicial. És per això que no són de la mateixa mida (són més curts, però no influeix en el muntatge del motor). A més són unipolars (5 o 6 sortides, en el cas dels motors usats 6), mentre que els motors utilitzats en el projecte inicial són bipolars (4 sortides). Tanmateix, un motor unipolar pot treballar com a bipolar connectant únicament les sortides 1-3-4-6.

3.3.2. DRIVER TB6560

Per controlar un motor pas a pas és necessari un driver. El projecte utilitza 6 drivers TB6560, per moure els respectius 6 motors pas a pas. Les característiques del driver són les següents:

PINS DEL DRIVER TB6560

CARACTERÍSTIQUES DEL DRIVER TB6560:

- La mida de la placa és: 75 x 50 x 35 mm
- La intensitat màxima en la qual pot treballar la placa és de 3A i 3.5A en el seu pic
- El voltatge de treball oscil·la entre els 10 i 35V
- El motor pot funcionar a full-step, $\frac{1}{2}$ step, $\frac{1}{8}$ step i $\frac{1}{16}$ step

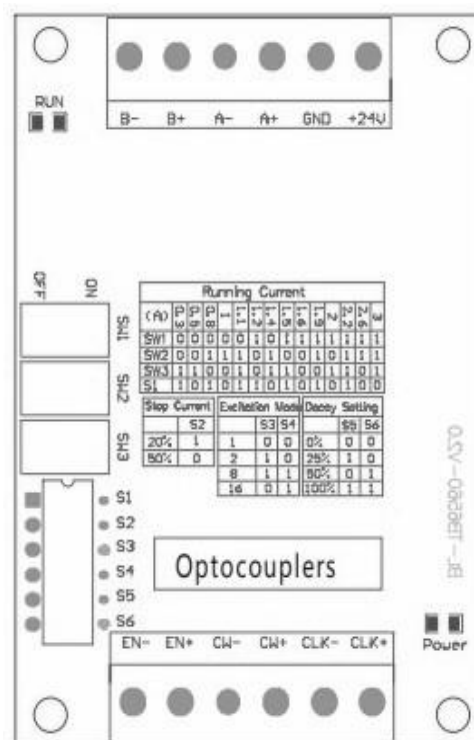
Les entrades +24V i GND són per la corrent.
(Recordatori: el driver+stepper pot funcionar amb 10V, no és necessària la entrada de 24V)

Les sortides A+ , A- , B+ i B- fa referència a les fases (o fase) del motor.

Les entrades CLK+ i CLK- fa referència al pols del motor, positiu i negatiu (la velocitat: el nombre de senyals per un temps determinat).

Les entrades CW+ i CW- fa referència a la direcció de rotació del motor.

Les entrades EN+ i EN- fan referència a activar i desactivar el driver.

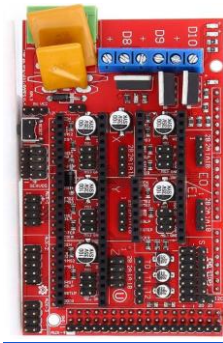


Il·lustració 48: Pins del driver TB6560.

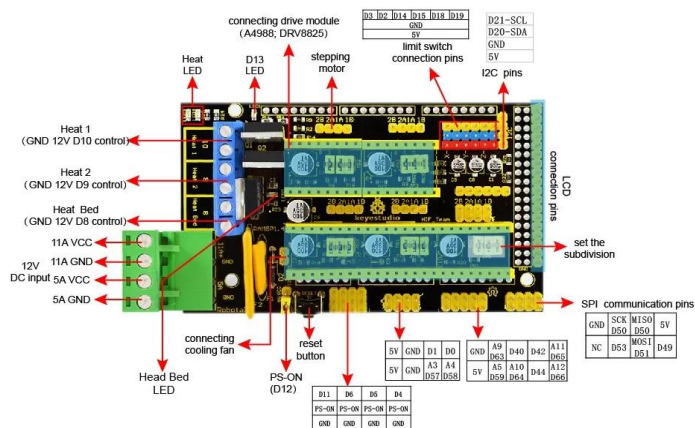
3.3.3. ARDUINO SHIELD RAMPS V1.4

Ramps v1.4 (Raprap Arduino Mega Pololu Shield) és una shield d'Arduino. Una shield és un circuit que s'incorpora a sobre de la placa d'Arduino i és connecta mitjançant els pins, sense la necessitat de cap tipus de connexió externa. La seva principal funció és augmentar la capacitat d'una placa Arduino base.

La placa utilitzada en el projecte és la ramps V1.4, que permet controlar fins a 6 motors pas a pas a la vegada, entre altres components.



Il·lustració 49: Arduino Shield Ramps V1.4.



Il·lustració 50: Pins de Arduino Shield Ramps V1.4.

L'objectiu principal d'aquesta pràctica era verificar que els motors funcionessin correctament, ja que es van comprar de segona mà. A més, vaig aprendre a utilitzar el driver tb6560 i configurar-lo amb les característiques d'un motor pas a pas (Nema 17 o 23).

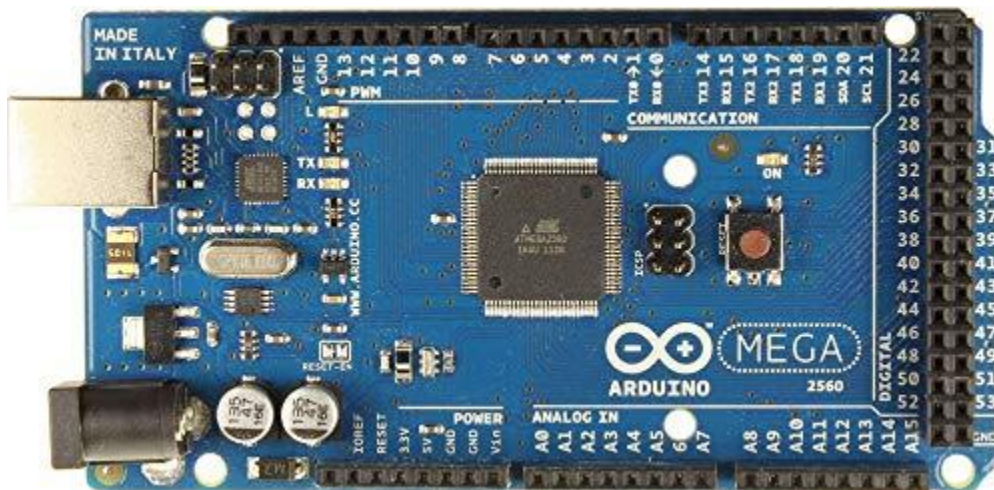
PROBLEMES DE LA RAMPS V1.4:

El principal problema que vaig tenir durant tot el projecte va ser per culpa de la Ramps V1.4. Vaig comprar aquesta Shield per Aliexpress, i va arribar defectuosa.

Els pins que teòricament havien d'encaixar amb la placa Arduino Mega 2560 no ho feien, ja que no estaven alineats els uns amb els altres; tanmateix, aquesta era una dificultat fàcil de superar. A més, un dels tres transistors, el pf60nf05, no feia contacte, fent que una de les fileres de control de motors estigués fora de servei (no es podia soldar).

3.3.4. ARDUINO MEGA

Arduino Mega 2560 és una placa microcontrolador basada en la ATmega2560. Té 54 pins d'entrada/sortida digitals (dels quals 15 es poden utilitzar com a sortides PWM), 16 entrades analògiques, 4 UARTs (ports sèrie de maquinari), un oscil·lador de cristall de 16 MHz, una connexió USB, una presa d'alimentació, un encapçalament ICSP i un botó de reset. Conté tot el necessari per suportar el microcontrolador; simplement connecta'l a un ordinador amb un cable USB o alimenta'l amb un adaptador d'AC a DC o una bateria per començar. La placa Mega 2560 és compatible amb la majoria de shields dissenyats per a l'Uno i les anteriors plaques Duemilanove o Diecimila.⁵³



Il·lustració 51: Placa Arduino Mega 6560.

3.3.5. FONT D'ALIMENTACIÓ

El projecte s'alimenta amb dues fonts d'alimentació: una de 12V i l'altre de 24V. Els 12V són per donar voltatge a la placa Arduino Mega, la Shield Ramps V1.3 i els drivers. Els 24V alimenten els 6 motors pas a pas.

Inicialment, es va començar el projecte amb dues fonts d'alimentació: una provinent d'un ordinador i l'altre d'un projecte antic.

La font d'alimentació provinent de l'ordinador proporciona fins a 12V i és l'encarregada d'engegar i fer funcionar els drivers.

La font provinent d'un projecte antic proporciona fins a 27V, regulables amb un potenciòmetre. Tanmateix, va sortir defectuosa, i no proporcionava corrent constant. És per això que vaig utilitzar la font d'alimentació S-500-24, amb un AC INPUT de 110/220V +/-15% i un DC OUTPUT de 24V i 20A.

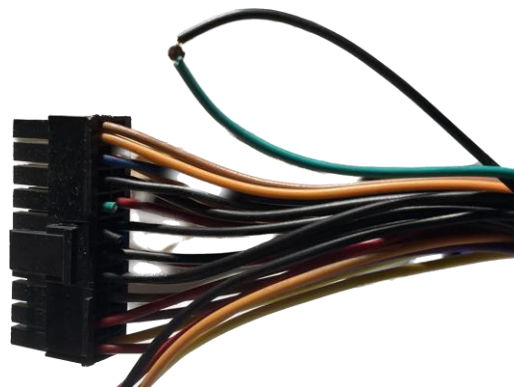
⁵³ <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

FONT D'ALIMENTACIÓ DE 12V - ATX 500W UNYKA

La font d'alimentació ATX 500w UNYKA és l'encarregada d'administrar 12V als 6 drivers dels seus motors corresponents. Aquesta font d'alimentació es va reutilitzar d'un ordinador antic.

CONNEXIÓ DE LA FONT D'ALIMENTACIÓ:

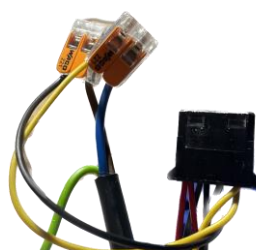
Per engegar la font d'alimentació, s'ha de connectar el cable que encén la font (el cable verd) al terra o GND (cable negre). Connectats aquests cables i la font connectada a 220V i amb l'interruptor encès, aquesta pot proporcionar de 3.3V a 12V, amb les seves intensitats corresponents.



Il·lustració 52: connexió dels cables que fan que la font entri en funcionament.

AC INPUT: 230V AC 5A 50-60Hz					
DC OUTPUT MAX	3.3V	5V	12V	-12V	5VSB
	28A	28A	22A	0.5A	2A
	500w Max				

Per tal d'aconseguir les prestacions desitjades (12V i 22A) s'han d'agafar els cables negre (negatiu) i groc (positiu).



Il·lustració 53: sortida de 12V.

3.4. DISSENY ELECTRÒNIC

3.4.1. MUNTATGE DE L'ESQUEMA

El muntatge de l'esquema se centra en l'assemblatge del sistema electrònic per aconseguir el seu funcionament.

A la placa Arduino Mega (la placa mare) se li acobla la ramps V1.3 (una shield), per tal de simplificar la connexió d'una màquina CNC⁵⁴. Els drivers van connectats als diversos motors i a la shield respectivament.

CONFIGURACIÓ DEL DRIVER

Primerament, al Driver TB6560 se li ha d'especificar la intensitat màxima a la qual treballa el motor pas a pas i la resolució de micropassos.

CONNEXIÓ DEL DRIVER A LA SHIELD

Les sortides negatives, és a dir: EN-, CW-, CLK-, van connectades al GND.

L'EN+ va connectat al enable

El CW+ va connectat al direction

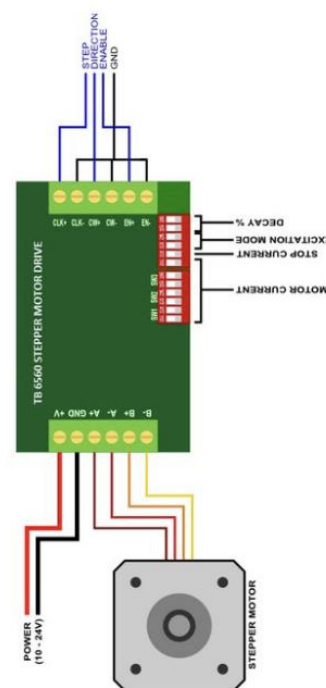
El CLK+ va connectat al step

CONNEXIÓ DEL DRIVER AL MOTOR

El primer bobinat va connectat als pins B- i B+.

El segon bobinat va connectat als pins A- i A+.

Els pins V+ i GND van connectats a la font d'alimentació.



Il·lustració 54: Esquema del driver TB6560 amb un Nema 17.

⁵⁴ Una màquina CNC (Computer Numerical Control) és un sistema que permet el control de la posició d'un element que està muntat a l'interior d'una màquina o eina mitjançant un programari especialment dissenyat per a això.

3.5. IMPRESSIÓ 3D

S'anomena impressió 3D al conjunt de tecnologies de fabricació on es realitza un procés additiu de capes bidimensionals que es superposen successivament per crear un objecte tridimensional.

La impressió 3D ha estat una de les peces clau d'aquest projecte. S'hi han dedicat moltes hores, unes 365h, i uns 3 Kg de filament, aproximadament.

La sort de tenir contacte directe amb gent que domina la impressió 3D a l'Institut m'ha sigut de gran ajuda en el procés.

3.5.1. IMPRESORA 3D

Per la impressió d'aquest treball de recerca he utilitzat la impressora Ultimaker S5⁵⁵, de la casa Ultimaker.

CARACTERÍSTIQUES

VOLUM: 330 x 240 x 300 mm.

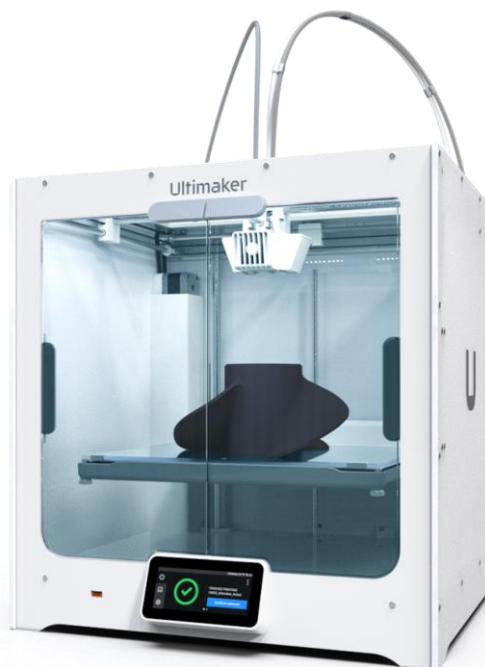
DOBLE EXTRUSIÓ: 2 filaments diferents simultàniament.

GRAN FIABILITAT: sensors de flux de filament, components d'alta qualitat...

VERSATILITAT DE MATERIALS

INTERFÍCIE D'USUARI TÀCTIL

SEGURETAT D'IMPRESSIÓ:
Càmbra de construcció tancada.
(entorn d'impressió estable).



Il·lustració 55: Impresora Ultimaker S5.

⁵⁵ L'Ultimaker S5 és una impressora 3D d'alta gamma coneguda per la seva fiabilitat, precisió i facilitat d'ús.

3.5.2. MATERIAL DE FABRICACIÓ

Existeix una gran varietat de materials disponibles per realitzar impressions mitjançant la tecnologia FFF⁵⁶. Alguns dels més importants (i els presents al treball) són:

PLA	
<u>AVANTATGES</u>	<u>INCONVENIENTS</u>
biodegradable i ecològic facilitat d'ús interior bon detall i estètic econòmic	baixa resistència al calor (60°C) poca durabilitat no apte per a ús exterior higroscòpic propietats mecàniques limitades

PETG	
<u>AVANTATGES</u>	<u>INCONVENIENTS</u>
força i durabilitat resistència química resistència a la temperatura flexibilitat econòmic	més brut adhesió a la base d'impressió higroscòpic emissió d'olor durant la impressió acabat superficial

Inicialment, es va decidir que el treball seria imprès amb PLA, ja que ja havia tingut un contacte previ amb aquest material i, tot i que la impressora de l'institut permet la impressió amb PETG, no es podia imprimir per un tema de seguretat.

No obstant això, es van aprofitar algunes peces del braç d'un altre projecte impreses amb PETG, així com es va portar a imprimir la base a una empresa externa que la va imprimir amb PETG.

⁵⁶ La tecnologia FFF (Fabricació amb Filament Fus, en català) en impressió 3D és un mètode on un material termoplàstic és escalfat i extret a través d'una boquilla per a dipositar-lo capa per capa i construir un objecte tridimensional.

3.5.2. Paràmetres i aspectes de la impressió

A l'hora d'utilitzar la tecnologia d'impressió 3D per FFF, s'han de tenir en compte diferents paràmetres que influenciaran directament el procés i el resultat de la impressió. Hi destaquen els següents, entre altres:

La velocitat d'extrusió del filament: La velocitat amb la qual el filament es fon i s'extreu a través de la broqueta de l'extrusor per formar les capes de l'objecte que s'està imprimint. És una variable que afecta el temps d'impressió i la qualitat de l'acabat de la peça.

L'aixecament de capes (o *warping*): es refereix a quan les cantonades o vores d'una peça impresa es corben del llit d'impressió durant el procés, el que pot distorsionar o arruïnar la impressió. Això és degut a la manca d'un entorn d'impressió i canvis de temperatura, produint contraccions no homogènies.

L'adhesivitat entre les capes: Quan el filament es fón i es diposita en una capa superior a l'anterior perd la seva forma cilíndrica original, afegint-se en major o menor grau a la capa interior. El seu empilat genera un perfil vertical discontinu.

L'emplenament (o *infill*): es refereix a l'emplenament interior de les peces, ja que no acostuma a ser massís. El grau d'emplenament varia oscil·la entre el 10-80% i la malla presenta un patró geomètric.

En el cas del braç robòtic, l'emplenament ha oscil·lat entre el 15-25%, pel fet que com més massissa la peça, més pesa, i per les peces més allunyades de la base es buscava agilitat i lleugeresa.

3.5.3. ESTRUCTURES DE SUPORTS

A l'hora d'imprimir en 3D, s'utilitzen estructures durant el procés per a assegurar l'estabilitat i precisió de la peça. N'existeixen de diversos tipus, com ara els suports, les basses (o *raft*), vores (o *brim*), faldons (o *skirt*), torres o pilons...

Les més determinants en el treball han estat els suports, estructures temporals sota parts flotants (com, per exemple, el forat per un coixinet) que eviten que la peça s'ensorri o es deformi durant el procés d'impressió. Un cop finalitzada la impressió, s'eliminen amb gran facilitat.

3.6. PROGRAMACIÓ DEL BRAÇ ROBÒTIC

3.6.1. FIRMWARE I PROGRAMARI

Un firmware⁵⁷ (o suport lògic inalterable) és un software que permet comunicar-se i controlar amb el hardware de forma directa; les seves característiques principals són les següents:

- El firmware sempre es troba en una memòria no volàtil, com ara una memòria ROM, EPROM o flash.
- El firmware, igual que qualsevol software, es pot modificar i crear versions pròpies.

Per tant, un firmware és bàsicament qualsevol contingut programable d'un dispositiu de hardware no només codi de màquina per a un processador, sinó també configuracions i dades per als circuits integrats per a aplicacions específiques (ASIC), dispositius de lògica programable, etc.

3.6.1.1. FIRMWARE MARLIN

Marlin és un firmware de codi obert per a la família RepRap de prototips replicants ràpids, popularment coneguts com a "impressores 3D". Va ser derivat de Sprinter i grbl, i es va convertir en un projecte de codi obert independent el 12 d'agost de 2011 amb la seva publicació a Github. Marlin està llicenciat sota la GPLv3 i és gratuït per a totes les aplicacions.	FIRMWARE MARLIN 2.1.2.1 
---	--

Des del principi, Marlin va ser construït per i per a entusiastes de RepRap per ser un controlador d'impressora senzill, fiable i adaptable que "simplement funciona". Com a testament de la seva qualitat, Marlin és utilitzat per diverses impressores 3D comercials respectades.⁵⁸

⁵⁷ El terme va ser encunyat per Ascher Opler en un article de la revista Datamation, publicat el 1967. Originalment, es referia al microshiva contingut en un emmagatzematge de control escribible (una àrea petita especialitzada de memòria RAM), que definia i implementava el conjunt d'instruccions del computador.

⁵⁸ <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>

El control del firmware Marlin és similar al llenguatge de programació C, en anglès G-code (o RS-274). El llenguatge en programació C és el llenguatge més usat en control numèric (CNC). Les instruccions de codi G es proporcionen a un controlador de màquina que indica als motors on s'han de moure, a quina velocitat es mouen i quin camí han de seguir.

Per tal d'implementar el firmware Marlin en el projecte, s'ha de configurar i ajustar els paràmetres necessaris, com ara el baudrate⁵⁹, el model de placa, el model de drivers, la font d'alimentació, les velocitats i acceleracions dels diversos motors, els finals de cursa, el nombre de servos connectats...

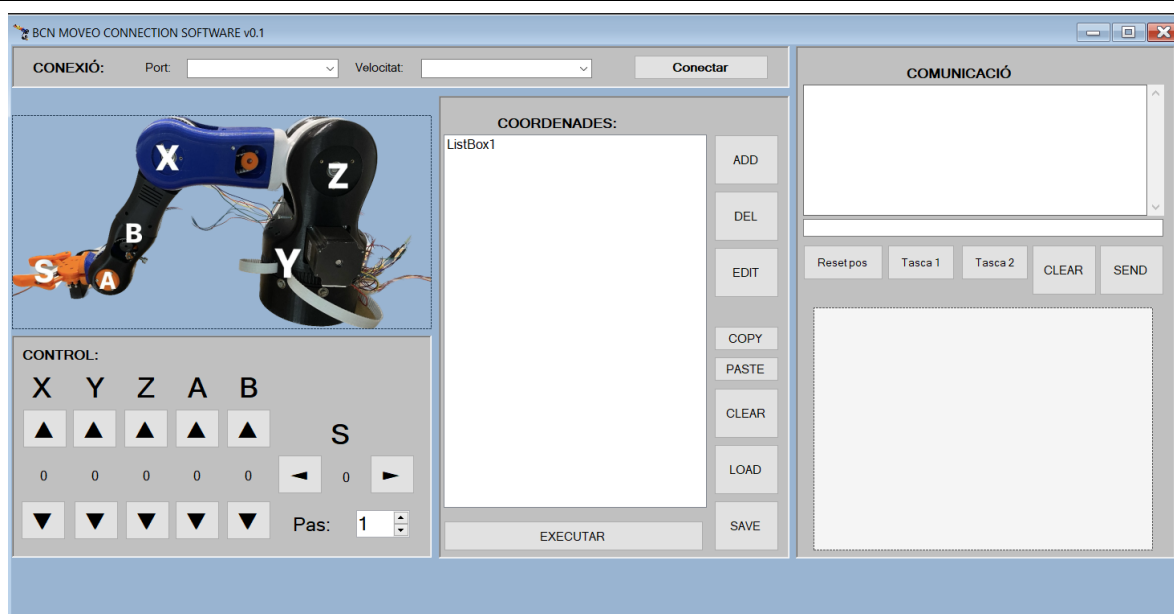
3.6.1.2. CONTROL DEL BRAÇ ROBÒTIC MITJANÇANT UN PROJECTE WINDOWS FORMS. NET FRAMEWORK

El braç que presentem funciona mitjançant un projecte Windows Forms. Net Framework: una aplicació d'escriptori desenvolupada utilitzant la tecnologia Forms.

Windows forms és una biblioteca d'interfície d'usuari (UI) de l'entorn de desenvolupament .NET Framework, la qual es caracteritza per la simplicitat a l'hora de crear interfícies gràfiques (interfície gràfica d'usuari o GUI), per oferir una gran varietat de controls (botons, llistes...) i per usar llenguatges compatibles amb NET Framework, com ara C# o Visual Basic.

⁵⁹ Terme per referir-se a la velocitat de transmissió de dades.

Windows Forms Moveo



II·lustració 56: Windows forms.

El braç es pot accionar directament, escollint el número que es vol fer accionar cada motor en concret, escrivint les coordenades d'un moviment o d'un seguit de moviments i executar-los o amb tasques prèviament establertes.

CODI:



EXPLICACIÓ BÀSICA DEL CODI:

El programa es comunica amb la placa Arduino Mega mitjançant el port sèrie quan es clica el botó *CONNECTAR*:

```
1 Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
    ↳ btn_conectar.Click  
2  
3     If Not SerialPort1.IsOpen Then  
4         SerialPort1.PortName = cmb_ports.SelectedItem  
5         SerialPort1.BaudRate = cmb_baud.SelectedItem  
6         txt_comunicacion.Text = SerialPort1.PortName  
7         txt_comunicacion.Text = txt_comunicacion.Text &  
            ↳ SerialPort1.BaudRate  
8     Try
```

```

9         SerialPort1.Open()
10
11         btn_conectar.Text = "Desconectar"
12         bloqueoinicial()
13
14
15     Catch ex As Exception
16         MessageBox.Show("Puerto serial no encontrado!")
17         btn_conectar.Text = "Conectar"
18         Exit Sub
19     End Try
20 Else
21     Try
22         SerialPort1.Close()
23         btn_conectar.Text = "Conectar"
24
25     Catch ex As Exception
26         MessageBox.Show("Imposible cerrar la conexión!")
27         btn_conectar.Text = "Desconectar"
28         Exit Sub
29     End Try
30
31 End If
32 End Sub

```

A continuació es determinen els passos que es vol fer girar cada motor:

```

1     WriteGCode("G1 X" & ejex & " Y" & ejey & " Z" & ejez & " E" &
        ↳ ejee & " B" & ejeb & " S" & ejes)

```

Seguidament, s'envia el comandament del moviment dels motors al port sèrie mitjançant la subrutina *WriteGCode(ByVal gcode As string)*:

```
1 Private Sub WriteGCode(ByVal gcode As String)
2     'SerialPort1.Open()

3     If Not SerialPort1.IsOpen Then
4         Try
5             SerialPort1.Open()
6             'FlushPort()
7         Catch ex As Exception
8             MessageBox.Show("Puerto serial no encontrado!")
9             Exit Sub
10        End Try
11    End If

12
13    'FlushPort()
14    SerialPort1.WriteLine(gcode)
15    'ReadPortOK() '
16 End Sub
```

Finalment, els valors de les etiquetes s'actualitzen per saber la posició de cada motor amb la subrutina *actualizapositiones()*:

```
1 Sub actualizapositiones()
2     lbl_posx.Text = ejex
3     lbl_posy.Text = ejey
4     lbl_posz.Text = ejez
5     lbl_posa.Text = ejee
6     lbl_posb.Text = ejeb
7     lbl_poss.Text = ejes
8
9 End Sub
```

3.7. MUNTATGE DEL BRAÇ

Un cop comprovat que el muntatge elèctric estava correcte vaig procedir a muntar el braç. No vaig seguir l'ordre establert en el manual d'instruccions del braç robòtic BCN3D Moveo, sinó que anava muntant els assemblatges a mesura que s'anaven imprimint les diverses peces (vaig començar a imprimir les peces de les més grans, les de la base, fins a les més lleugeres i petites, les de la punta).

Aquesta part del treball va ser la més entretinguda, ja que tot i tenir un manual de muntatge, sempre apareixen complicacions i reptes durant el procés.

LA BASE

Dimarts 3 d'octubre es comença a muntar el braç. Primerament, s'introdueixen els cargols M5 x 20 mm dins del coixinet de dimensions 5 mm x 16 mm x 5 mm. He prescindit dels coixinets autolubricats, a causa de la seva manca d'Estoc a les ferreteries i a les webs de la intranet. Seguidament, s'han introduït dos coixinets de dimensions 8 mm x 22 mm x 7 mm al centre de la peça 1M2 (un a sobre i l'altre a baix). A continuació, s'han introduït 8 femelles autoblocants al voltant de la peça 1M2 amb els seus respectius cargols i coixinets.



Il·lustració 57: base del braç robòtic.

ASSEMBLATGE 1

A continuació es procedeix a muntar el primer assemblatge, que involucrarà les peces 2M2H, 2M2M, T2M1D, T2M1I, 2M1 i la tapa 2M1. Mitjançant 4 cargols M8 x 40 mm i les seves respectives femelles autoblocants s'ajunten les peces 2M2H i 2M2M, després d'haver introduït femelles M4 per posteriorment cargolar la peça 3M1. Seguidament, se li insereix el motor Nema 17 amb caixa planetària dins la peça 3M1 mitjançant 4 cargols M5 x 14 mm i les femelles M5 respectives, i se'ls insereix les dues politges T5, de 8 mm de calibre, 14 dents i 17 mm d'amplitud. Seguidament, es munten els tensors de les corretges dentades amb les peces T2M1D, T2M1I, 6 rodaments 4 mm x 13 mm x 5 mm (3 rodaments en casa tensor), 2 cargols M4 x 20 mm i les femelles M4 respectives per subjectar els rodaments, una femella M3 i un cargol M3 x 25 mm per subjectar els tensors a la peça 2M1. Seguidament s'enrosquen els 2 motors Nema 23 a la peça 2M1 mitjançant 8 cargols M5 x 14 mm i 8 femelles M5 i se'ls insereix les dues politges T5, de 8 mm de calibre, 14 dents i 17 mm d'amplitud. Ara s'ajunta el primer subassemblatge amb el segon mitjançant 2 rodaments 8 mm x 22 mm x 7 mm, una barra llisa de 134 mm (recomano utilitzar-ne una de 138 mm) i dues corretges dentades T5 de 16 mm d'amplitud. Es posen les 2 tapes 2M1 per amagar els coixinets, roscats mitjançant insertes i cargols M3 x 10 mm.



Il·lustració 58: assemblatge 1 del braç robòtic.

GRIPPER

El gripper és la part més complexa del muntatge. Involucra les peces top plate, bottom plate, cilindres, gripper left, gripper right, idol gear, pivot arm i servo gear. Primerament, s'adjunta el top plate amb els 2 servo gears i els seus 2 idol gears respectius mitjançant 5 caragols M3 x 16 mm i 5 volanderes M5. S'introdueixen els dos cilindres i, posteriorment el bottom plate, i s'enrosquen els caragols M3 amb les seves femelles respectives. Seguidament, mitjançant 4 caragols M3 x 16 mm i 4 femelles M3 s'encollen el left gripper i el right gripper amb la pivot arm i l'idol gear corresponents. A continuació es munta el segon subassembatge, que involucra les peces 4M2 i 4M2C. Aquestes dues peces s'uneixen mitjançant 3 caragols M4 x 25 mm i les seves respectives femelles autoblocants. El gripper i aquests assemblatges s'uneixen mitjançant 4 caragols M3 x 16 mm i 4 femelles M3.



Il·lustració 59: pinça del braç robòtic.

ASSEMBLATGE 2

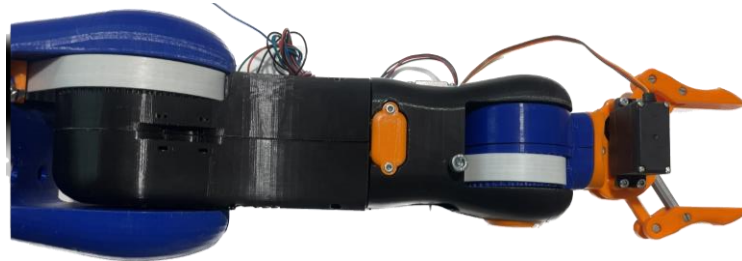
El segon assemblatge involucra les peces 3M2C, 3M2 (que vaig haver de modificar, ja que el meu motor Nema 17 era d'unes dimensions superiors), 4M1 i la tapa TBB. Primerament, s'insereix el motor Nema 17 dins la peça 3M2C i se li insereix un acoblador de 5 mm a 8 mm, juntament amb una barra roscada de 42 mm (a causa del fet que la tija del meu motor Nema 17 era més llarga, vaig haver de reduir la barra roscada a 37.5 mm) i un rodament de 8 mm x 22 mm x 7 mm. Paral·lelament, vaig introduir un rodament 8 mm x 27 mm x 7 mm per l'orifici de la peça 4M1 i posteriorment vaig tapar-lo amb la tapa TBB mitjançant 2 caragols M3 x 12 mm i els seus insertes corresponents. Seguidament, vaig muntar un altre tensor de la corretja amb la presa T4, 3 rodaments de dimensions 3 mm x 10 mm x 4 mm i un caragol M3 x 20 mm amb la seva femella corresponent per aguantar els coixinets, que posteriorment s'uneixen a la peça 4M1 mitjançant un caragol M3 x 30 mm. Seguidament, s'insereix i s'enrosca el motor nema 14 a la peça 4M1 i s'insereix la politja T5, de calibre 5 mm, 10 dents i 17 mm d'amplitud. A continuació s'uneix el preassemblatge de la peça 4M1 amb la peça 3M2C, mitjançant la barra roscada. Per acabar de muntar l'assemblatge, s'uneix la peça 3M2C amb la peça 3M2 mitjançant 6 caragols M3 x 40 mm amb les respectives femelles.



Il·lustració 60: assemblatge 2 del braç robòtic.

UNIÓ DEL GRIPPER AMB EL SEGON ASSEMBLATGE

Mitjançant 2 rodaments de 8 mm x 22 mm x 7 mm, una barra llisa de 80 mm de llargària i una corretja dentada T5 de 16 mm d'amplitud s'uneixen el gripper amb el segon assemblatge. Després, es tapen els coixinets i la barra llisa amb la tapa 4M1, mitjançant insertes M3 i 6 caragols M3 x 12 mm.



Il·lustració 61: unió del gripper amb l'assemblatge 2 del braç robòtic.

UNIÓ DEL PRIMER ASSEMBLATGE AMB L'ASSEMBLATGE DEL GRIPPER I EL 2n ASSEMBLATGE

Mitjançant 2 rodaments de 8 mm x 22 mm x 7 mm i una barra llisa de 114 mm de llargada i una corretja dentada T5 de 16 mm d'amplitud s'uneixen el primer assemblatge amb el segon assemblatge (i el gripper). Després, es tapen els coixinets i la barra llisa amb la tapa 3M1, mitjançant insertes M3 i 6 caragols M3 x 10 mm.



Il·lustració 62: unió de l'assemblatge 1 amb l'assemblatge del gripper i l'assemblatge 2 del braç robòtic.

UNIÓ DE LA BASE AMB EL BRAÇ I A LA FUSTA

Primerament, s'ha cargolat la base a la fusta mitjançant 4 cargols M4 x 40mm i les seves femelles autoblocants respectives. A continuació s'ha unit el braç amb la peça M1 (amb la corretja ja inserida) i amb la base mitjançant 6 cargols M4 x 45mm, un cargol M8 x 65mm i la seva femella autoblocant respectiva. Finalment, la corretja unida a la peça 1M1 s'ha connectat amb la politja T5, de calibre 5 mm, 10 dents i 17mm d'amplitud que estava a la tija d'un motor Nema 17 prèviament cargolat a la base.

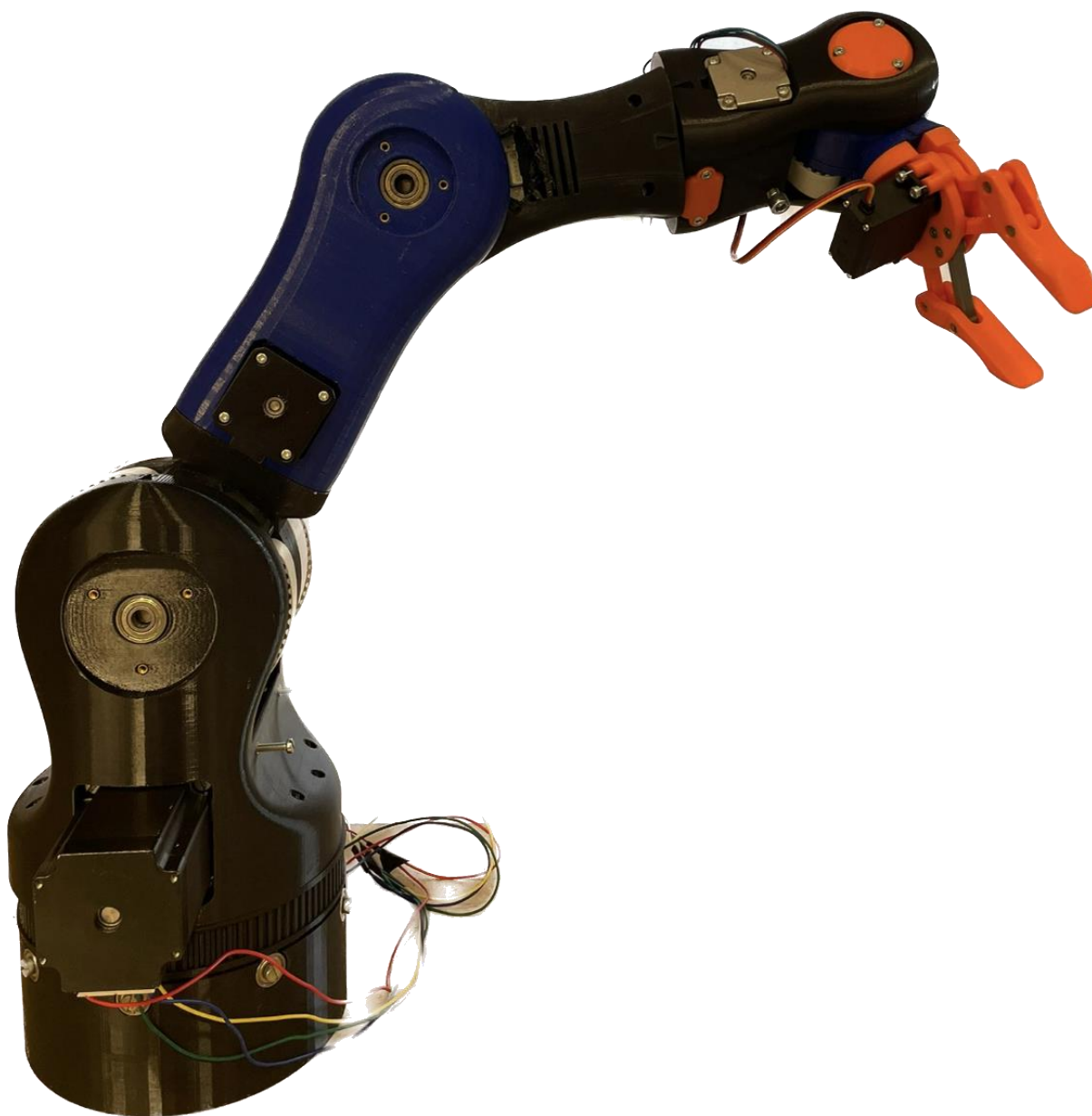


Il·lustració 63: unió del braç amb la base.

3.8. CONTINGUT AUDIOVISUAL DEL PROJECTE



Il·lustració 64: Recull de tot el procés.



Il·lustració 65: Braç robòtic BCN3D Moveo.

4. CONCLUSIONS

4.1. CONCLUSIONS TEÒRIQUES

Un dels principals reptes per dur a terme el meu treball de recerca era dotar-me del coneixement necessari. Durant el transcurs del treball, m'he endinsat en les àrees diferents involucrades el projecte: la robòtica, l'electrònica, la mecànica, el disseny 3D... i he arribat a entendre el perquè de les coses, no només com funcionen, sinó també perquè funcionen d'aquella manera en concret. Una bona base teòrica m'ha proporcionat els coneixements necessaris per poder construir un braç robòtic industrial a escala, aplicant tota la informació en un model experimental i permetent-me superar tots els obstacles que he tingut durant en procés de muntatge.

Al ser un projecte amb una versatilitat de camps que el componen, m'ha obert les portes a diverses disciplines de coneixement de gran utilitat. Aquest enfocament interdisciplinari m'ha permès entendre la interconnexió i la complementarietat de diverses disciplines en el desenvolupament de qualsevol projecte, com és el de construir un braç robòtic industrial.

4.2. CONCLUSIONS PRÀCTIQUES

La part experimental d'aquest treball de recerca m'ha permès arribar a les següents conclusions per cadascuna de les etapes del procés de construcció del braç robòtic:

Disseny:

El disseny del braç té una gran precisió i està ben pensat. No obstant això, està pensat per uns components molt concrets, i quan es prescindeix d'algun d'ells o s'intercanvien per uns altres les coses no encaixen amb tanta precisió. És per això que considero el disseny com un procés cíclic el qual es basa en provar, analitzar i tornar a dissenyar per tal que els teus components encaixin perfectament i el braç pugui funcionar.

Tanmateix, hi ha algunes peces que, degut a la manca de temps, no he pogut modificar i presenten un disseny deficient, com per exemple els tensors de les corretges, amb especial èmfasi en els tensors T2M1BD i T2M1BI. Aquestes dues peces de petita dimensió suporten una força que no és adequada per la seva mida, així com que no presenten un bon sistema de fixació (ballen), pel fet que estan cargolats únicament pel costat exterior de la peça. A més, l'orifici pel qual el cargol fa palanca al tensor està massa a prop del marge de la peça, fent que sigui fàcil que aquesta es trenqui.

Muntatge electrònic:

El muntatge electrònic no ha suposat massa problemes. Malgrat això, ha estat una gran font de coneixement, ja que, fins aleshores, mai no havia dut terme a l'institut cap activitat o projecte d'aquestes dimensions, on l'electrònica és clau. El muntatge elèctric té dues alternatives completament iguals: la connexió dels pins positius a la Shield i els negatius al GND o, inversament, la connexió de pins negatius a la Shield i els positius als 5V.

El muntatge elèctric del braç m'ha ensenyat la importància de l'aïllament de les connexions per evitar curtcircuits, així com verificar que els cables, pins... facin contacte entre ells.

Paral·lelament, he après que quan m'enfronto a un problema en el muntatge electrònic, el primer pas és, sempre, verificar que arribi corrent al component.

Impressió 3D:

Les característiques de cada material són claus en qualsevol treball. La impressió 3D en aquest treball de recerca ha estat un cop de realitat en la importància de planificar i escollir bé el material a utilitzar, així com determinar l'angle d'impressió i les estructures de suports per tal d'evitar punts febles de les peces.

És per això que una selecció acurada i ben informada dels materials és fonamental per a l'èxit de qualsevol projecte, garantint qualitat, eficiència, seguretat i sostenibilitat.

Muntatge mecànic:

El muntatge mecànic és la part que més problemes m'ha suposat. La familiarització amb les estructures, les accions que requerien molta precisió, la previsualització de com hauria de quedar l'assemblatge... han estat les parts més complicades del muntatge mecànic, ja que, si es feia malament, s'havia de repetir la peça en qüestió, suposant una despesa no tan sols econòmica, sinó també de temps.

Programació del braç:

La programació del braç era la part que més m'espantava per culpa dels problemes que havia tingut durant els muntatges, com ara problemes per tipus de processadors que no detectaven la placa (Windows 11), problemes amb *open sources* per controlar els motors (com ara l'*Universal Gcode Sender*) i problemes amb la configuració del firmware Marlin.

Això no obstant, després de solucionar els problemes, el control del braç va ser més senzill. El programa que controla el robot està escrit en Visual Basic, i es comunica amb la placa mitjançant el port sèrie. De totes maneres, després d'implementar la intel·ligència artificial al programa per tal que aquest jugués al tres en ratlla, considero que hauria estat òptim utilitzar C++ com a llenguatge de programació a causa del seu alt rendiment i eficiència, l'existència de biblioteques i frameworks⁶⁰ d'IA, la portabilitat...

⁶⁰ Un 'framework' és una estructura o conjunt d'eines, biblioteques i millors pràctiques que proporciona una base sobre la qual es poden desenvolupar i organitzar programes i aplicacions.

4.3. CONCLUSIONS PERSONALS

L'objectiu principal d'aquest treball de recerca, La construcció, programació i implementació d'un prototip de braç robòtic industrial, ha estat tot un repte per mi. La complexitat d'aquest treball es basa en les disciplines que involucra, així com els reptes que et trobes durant tot el procés. Hi destaco el següent:

M'ha ensenyat la necessitat d'organitzar-me eficientment en funció de completar terminis.

El temps ha estat un punt crític en aquest treball de recerca. El temps d'impressió, d'enviament de components i de muntatge del braç han fet del projecte un contrarellotge que no ha fet fàcil la seva consecució.

M'ha obert les portes de noves disciplines, amb especial èmfasi en la impressió 3D.

La impressió 3D ha estat clau en el meu projecte. M'ha ensenyat la importància dels materials a utilitzar, així com prendre decisions crítiques pel treball en diverses ocasions, com l'eliminació i reimpressió d'una peça que se li va ensorrar un suport durant la impressió, en un punt crític del projecte, ja que em quedava sense filament.

Les decisions basades únicament en criteris econòmics poden resultar costoses en temps i recursos.

Des de l'inici vaig tenir molts problemes amb el muntatge electrònic del braç: no entenia per què no anaven els motors si no hi havia cap error evident. Va resultar ser degut a un dels tres transistors de la Shield, que es va adquirir a un cost molt baix i va venir danyat de fàbrica. Així doncs, l'elecció d'aquest component d'una gamma molt econòmica va suposar, posteriorment, un cost molt elevat en temps (va portar moltes hores identificar la causa de no funcionament dels motors) i també en el meu estat d'ànim i motivació (al no poder veure resultats), fet que hauria pogut provocar un abandonament del treball per buscar-ne un altre.

M'ha ensenyat la importància que qualsevol peça té en un conjunt, doncs la més insignificant et pot portar molts problemes.

Els tensors de les corretges. Pot semblar la peça més insignificant de tota l'estructura del braç, però sense ells, el braç no es dota de moviment. La infravaloració d'aquests detalls va requerir la nova impressió de l'estructura més gran del braç.

I per acabar, i més important, m'ha ensenyat a resoldre problemes sense perdre la calma.

La situació amb el transistor danyat ha posat a prova la meua capacitat per resoldre problemes sense perdre la calma, reafirmant que la paciència és fonamental en els moments de dificultat. Durant aquest treball, he desenvolupat tècniques per la resolució de problemes que m'han permès continuar endavant i completar el projecte.

5 APÈNDIX

5.1. IA APLICADA A UN BRAÇ ROBÒTIC

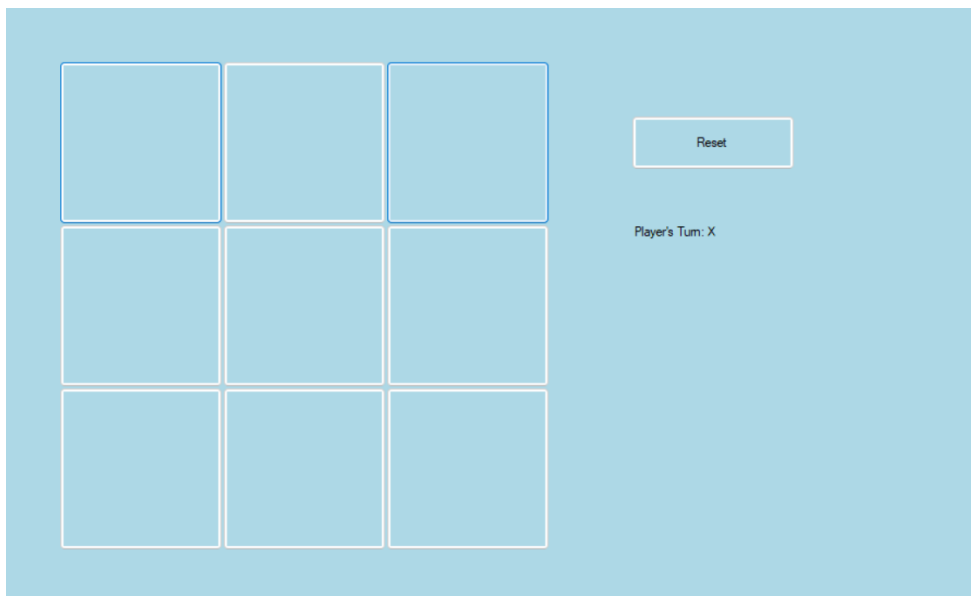
SpicyPepper i JouleJuggler

5.1.1. INTRODUCCIÓ

A partir dels dos treballs de recerca **"Estudi i implementació d'una intel·ligència artificial amb python : TicTacToe, Marienbad i Gomoku"** i **"Braç robòtic BCN3D Moveo: construcció, programació i implementació d'un model de braç robòtic industrial"**, i veient que es podien complementar, hem realitzat una part experimental utilitzant el braç robòtic construït per JouleJuggler com a plataforma per la IA programada en el treball del SpicyPepper. Mentre posàvem en comú els nostres treballs vam veure la possibilitat d'implementar el codi que el Yunkai havia creat per aprendre a jugar al tres en ratlla dins el programari que es fa servir per controlar el braç.

5.1.2. ADAPTACIÓ DELS CODIS PER PODER TREBALLAR CONJUNTAMENT

A partir de dos codis fets amb diferents llenguatges, hem hagut de fer les adaptacions necessàries perquè es poguessin comunicar. El codi de l'IA (amb python) es troba al treball del SpicyPepper i el codi del braç al del JouleJuggler . Els principals canvis que hem fet per adaptar els dos codis són: Problemes generals: Com que el codi estava fet amb python, hem hagut de traduir el codi a Visual Basic. Jo (SpicyPepper) he hagut de veure videotutorials per aprendre la sintaxi bàsica, a més, amb l'ajuda de JouleJuggler en alguns problemes puntuals, no ha sigut extremadament complicat programar i implementar la IA dins del codi que permet moure el braç robòtic.



Tres en ratlla sense IA:

Per crear la interfície vista a la imatge, primer creem dos panells (*paneljuego i panelturno*), un per al joc i l'altre per implementacions extres.

```

1  Dim currentPlayer As Integer = 1 ' 1 for Player X, -1 for Player O
2  Dim board(2, 2) As Integer ' 3x3 game board
3  Dim paneljuego As New Panel() ' Panel to hold the game board buttons
4  Dim panelturno As New Panel() ' Panel to hold the reset button and player
   ↪ turn label
5  Dim playerTurnLabel As New Label() ' Label to indicate player's turn

```

En el primer panell creem una quadrícula de 3x3 amb botons, els quals estaran directament relacionats amb una variable *board*, la qual és una *array* que conté els valors de cada botó. Òbviament, també hem situat i modificat els botons (*Size i Location*).

```

1  For i As Integer = 0 To 2
2      For j As Integer = 0 To 2
3          board(i, j) = 0
4          Dim button As New Button()
5          button.Size = New Size(150, 150)
6          button.Location = New Point(j * 150, i * 150)

```

```

7         button.Tag = New Point(i, j)
8         button.Font = New Font(button.Font.FontFamily, 18)
9         AddHandler button.Click, AddressOf Button_Click
10        paneljuego.Controls.Add(button)
11    Next
12 Next

```

Amb això fet, ja només queda implementar les regles del tres en ratlla i crear una funció per a quan es dona un clic a qualsevol botó.

```

1    Private Sub Button_Click(sender As Object, e As EventArgs)
2        [...]
3    End Sub

```

En el segon panell es crea un botó per reiniciar el joc (per no haver d'anar obrint i tancant per començar una nova partida) i es crea un fragment de text que indica de quin jugador és el torn.

```

1    Dim resetButton As New Button()
2    resetButton.Text = "Reset"
3    resetButton.Size = New Size(150, 50)
4    resetButton.Location = New Point(25, 50)
5    AddHandler resetButton.Click, AddressOf ResetButton_Click
6    panelturno.Controls.Add(resetButton)
7
8    ' Create player turn label and add it to panel2
9    playerTurnLabel.Text = "Player's Turn: X"
10   playerTurnLabel.AutoSize = True
11   playerTurnLabel.Location = New Point(25, 150)
12   panelturno.Controls.Add(playerTurnLabel)

```

3 en ratlla amb IA:

Per implementar la IA, recomanem veure el treball del Yunkai per entendre com funciona l'algoritme *Minimax*. Només hem hagut de traduir el codi de python a VB, tenint en compte la diferència de sintaxi.

```
1 Private Function GetBestMove() As Tuple(Of Integer, Integer)
2     Dim bestScore As Integer = -1
3     Dim bestMove As Tuple(Of Integer, Integer) = Nothing
4
5     For i As Integer = 0 To 2
6         For j As Integer = 0 To 2
7             If board(i, j) = 0 Then
8                 ' Empty cell, try the move
9                 board(i, j) = -1
10                Dim score As Integer = Minimax(board, 0, False)
11                board(i, j) = 0 ' Undo the move
12
13                If score > bestScore Then
14                    bestScore = score
15                    bestMove = New Tuple(Of Integer, Integer)(i, j)
16                End If
17            End If
18        Next
19    Next
```

La funció *GetBestMove* analitza totes les jugades possibles i arriba a les jugades que li permeten aconseguir la millor puntuació (guanyar = 1, perdre = -1, empatar = 0).

La part més important del codi es troba a la funció *Minimax*, l'encarregada d'analitzar totes les jugades en arbre i arribar a la puntuació desitjada.

Tres en ratlla amb IA implementada en el braç robòtic:

Per combinar els dos codis, hem hagut d'analitzar l'estructura dels dos per a veure quina és l'opció més efectiva. Al final hem optat per crear un panell que inclou els dos panells que s'han creat en el codi del tres en ratlla i simplement l'hem introduït dins del codi de l'aplicació del braç robòtic.

Per tal de determinar els moviments del braç, s'ha declarat una matriu per cada moviment que ha de fer el braç dins de la subrutina *Cargar_matriu()*, que prèviament s'ha hagut de declarar i inicialitzar amb la subrutina *Ini_matriu()*:

```

1  Dim Matriu(100, 6) As Integer
2
3  Private sub Ini_matriu()
4      for i = 0 to 99
5          for j = 0 to 5
6              Matriu(i, j) = 0
7          Next j
8      Next i
9  End sub
10
11 private sub Cargar_matriu()
12     Matriu(1, 0) = 50
13     Matriu(1, 1) = 50
14     Matriu(1, 2) = 50
15     Matriu(1, 3) = 50
16     Matriu(1, 4) = 50
17     Matriu(1, 5) = 50

```

(Aquí només es mostra la Matriu 1, que defineix el primer moviment)

A continuació s'ha creat la subrutina *executatasca(Num As Integer)* que envia els passos que s'ha de moure cada eix a la placa mitjançant la comunicació amb el port sèrie:

```

1 Private Sub Executa_Tasca(Num As Integer)
2     Cargar_matriu()
3     ' WriteGCode("G1 X" & Matriu(Num, 0) & " Y" & Matriu(Num, 1) & " Z" &
    → Matriu(Num, 2) & " E" & Matriu(Num, 3) & " B" & Matriu(Num, 4) &
    → " S" & Matriu(Num, 5))
4     'WriteGCode("G1 Z" & Matriu(Num, 2))
5     ' WriteGCode("G1 Z" & 30)
6     ' actualizapositiones()
7     ejex = ejex - Matriu(Num, 0)
8     ejey = ejey - Matriu(Num, 1)
9     ejez = ejez - Matriu(Num, 2)
10    ejee = ejee - Matriu(Num, 3)
11    ejeb = ejeb - Matriu(Num, 4)
12    ejes = ejes - Matriu(Num, 5)
13
14    WriteGCode("G1 X" & ejex & " Y" & ejey & " Z" & ejez & " E" & ejee &
    → " B" & ejeb & " S" & ejes)
15    ' WriteGCode("G1 Z" & ejez)
16    actualizapositiones()
17 End Sub

```

No obstant això, ens hem trobat amb un problema a l'hora de transmetre la millor jugada al braç a causa d'un problema de variables: *executatasca()* només admet un nombre enter com a variable i, com que el codi del tres en ratlla utilitza un tauler de dues dimensions, la funció *GetBestMove* ens retorna un tipus de variables anomenat *tuple* que conté dos nombres en comptes d'un (columna i fila). Afortunadament, SpicyPepper ja havia tingut un problema similar amb el seu codi de python (passar de dues dimensions a una), per tant, només vam haver d'utilitzar el codi que tenia. Creiem que no és la forma més efectiva però funciona.

```

1 Private Function Valor_unidimensional(Conjunt As Tuple(Of Integer,
  ↳ Integer))
2
3 Dim valor As Integer
4
5 If Conjunt.Item1 + Conjunt.Item2 = 0 Then
6     valor = 0
7 ElseIf Conjunt.Item1 + Conjunt.Item2 = 1 Then
8     If Conjunt.Item1 = 1 Then
9         valor = 3
10    Else
11        valor = 1
12    End If
13 ElseIf Conjunt.Item1 + Conjunt.Item2 = 2 Then
14     If Conjunt.Item1 = 2 Then
15         valor = 6
16     ElseIf Conjunt.Item2 = 2 Then
17         valor = 2
18
19 Else
20     valor = 4
21 End If
22 ElseIf Conjunt.Item1 + Conjunt.Item2 = 3 Then
23     If Conjunt.Item1 = 1 Then
24         valor = 5
25     Else
26         valor = 7
27     End If
28 ElseIf Conjunt.Item1 + Conjunt.Item2 = 4 Then
29     valor = 8
30 End If
31
32 Return valor
33
34 End Function

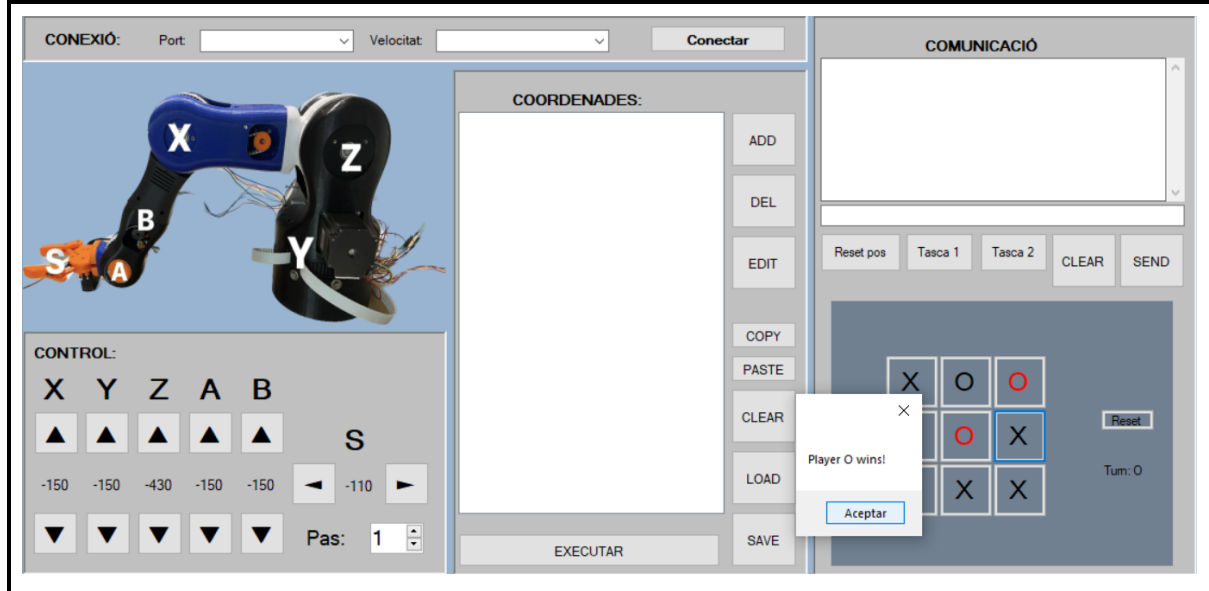
```

Finalment, quan a la IA decideix la posició més òptima del seu torn, s'executa *Executa_Tasca(Valor_unidimensional(bestMove))* i el braç fa el moviment:

```
1      If bestMove IsNot Nothing Then
2          board(bestMove.Item1, bestMove.Item2) = currentPlayer
3          Dim computerButton As ButtoGetButton(bestMove.Item1, bestMove.Item2)
4          computerButton.Text = "0"
5          Executa_Tasca(Valor_unidimensional(bestMove))
6          MessageBox.Show(Valor_unidimensional(bestMove))
7          If CheckForWin(1) Or CheckForWin(-1) Then
8              ApplyWinningColor()
9              MessageBox.Show("Player 0 wins!")
10             InitializeGame()
11         ElseIf CheckForDraw() Then
12             MessageBox.Show("It's a draw!")
13             InitializeGame()
14         Else
15
16             currentPlayer *= -1 ' Switch player
17             UpdatePlayerTurnLabel()
18         End If
19     End If
```

5.1.3. RESULTATS

Tenim uns resultats molt preliminars, però tot i així hem aconseguit que la intel·ligència AI pugui ser executada per la plataforma del braç robòtic permetent-lo jugar al tres en ratlla, fent que el braç es mogui a la posició més òptima i faci que l'usuari mai guanyi.



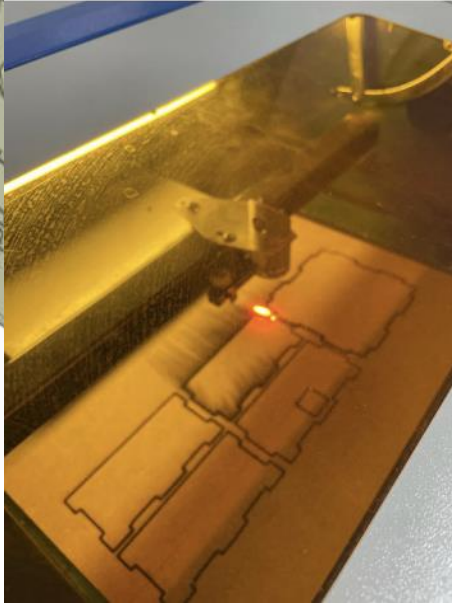
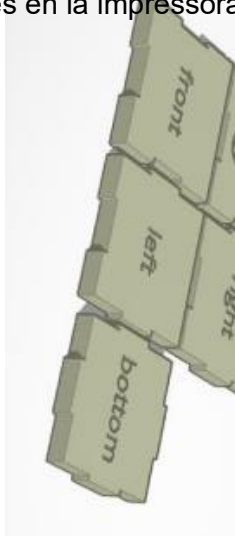
5.1.4. BRAÇ ROBÒTIC AMB SENSORS

Un cop acabats els treballs de recerca individuals, vam decidir continuar amb el projecte sobretot per dos motius: per què sabem que amb una mica més d'esforç milloraríem molt els resultats i per què treballant conjuntament ens enteníem i veiem que apreníem més ràpidament. El nostre principal objectiu era afegir un tauler amb sensors que realitzés la funció d'intermediari entre el nostre programa i un usuari en el món físic, per donar 'vida' al braç i posar la teoria explicada en l'apartat anterior a la pràctica. El que creiem que serien unes hores de treball, han resultat moltes tardes plenes d'"assaigs i errors" amb bons resultats, però també fracassos que ens han fet replantejar l'estratègia moltes vegades. Finalment, hem aconseguit la majoria de les fites bàsiques que ens havíem plantejat des de l'inici.

5.1.4.1. TAULER

El primer pas ha estat construir un tauler en 3 dimensions. Hem decidit que seria de fusta per tal de poder utilitzar la caladora làser que disposem a l'institut. Primerament, s'ha determinat el disseny del tauler. A causa de les restriccions de mida de la caladora làser hem hagut de dissenyar 9 caixes individuals per després adjuntar-les i crear un únic tauler. Hem utilitzat

l'aplicació web Makercase per tal de dissenyar les caixes. Les dimensions de les caixes són 85mm x 85mm x 40mm i en una cara hi ha un forat (fet amb TinkerCAD) per deixar espai pels sensors. Un cop tallades les peces s'han hagut de muntar les caixes. Han estat dissenyades amb les unions en forma de dents als costats per tal de facilitar el muntatge. Finalment, s'han enganxat les 9 caixes individuals en una base comuna, que està subjectada per 4 potes impreses en la impressora 3D.



Plànols al tinkercad

Fusta tallada per làser

Pota amb impressora 3D

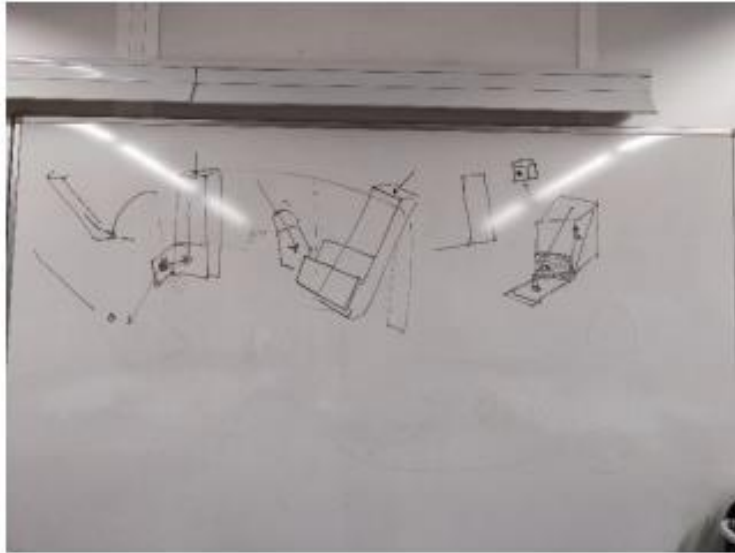
5.1.4.2. DISPENSADOR DE FITXES

El següent pas ha estat crear un dispensador de peces perquè el braç sempre les agafi des del mateix punt. Es tracta d'una rampa amb un imant al final de la trajectòria que fixa la peça (que també hi porta un imant) en una posició determinada. El principal problema ha estat determinar la força de l'imat, que sigui prou forta per atraure la peça, però que el braç tingui la suficient força per vèncer la d'atracció. A més, un gran inconvenient que hem tingut ha sigut

degut a la precisió irregular del braç, el que ens ha fet canviar la nostra estratègia i finalment donar-li les peces a mà.



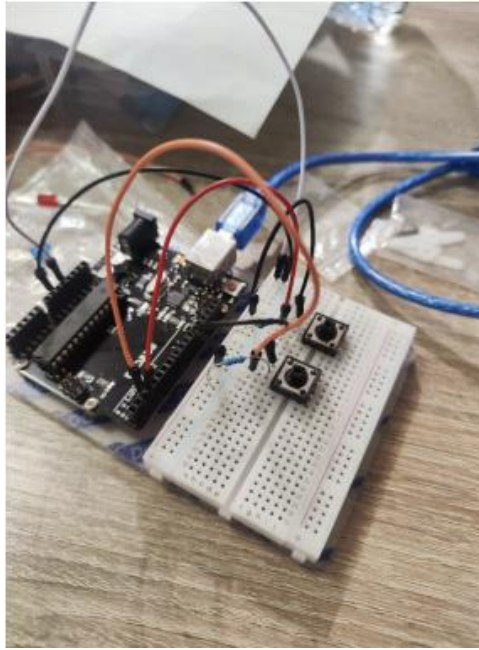
Dispensador magnètic



Plànols del dispensador

5.1.4.3. COMUNICACIÓ PORT SÈRIE ARDUINO I VB

Per a transportar dades d'Arduino al Visual Basic hem hagut de dur a terme una recerca sobre les connexions en sèrie entre els dos programes. Primer de tot hem dut a terme proves amb botons que actuaven com a sensors.



Proves amb botons

Els trossos de codi més importants per a la comunicació en sèrie són:

```
1 Dim puertoSerialSensors As New SerialPort("COM5", 9600)
2
3 Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
4     puertoSerialSensors.Open() ' Abre la conexión al puerto serial
5     TimerSensors.Enabled = True ' Habilita el temporizador para leer datos
6     TimerSensors.Interval = 1000
7 End Sub
```

Finalment, hem aplicat la mateixa lògica dels programes més senzills al programa principal. A més, van ser necessàries una sèrie de modificacions per adaptar la comunicació en port sèrie amb el programa del tres en ratlla:

```

1 Private Sub TimerSensors_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles
    ↳ TimerSensors.Tick
2     Dim datos As String = puertoSerialSensors.ReadLine()
3     If Len(datos) > 2 Then
4
5         Dim desxifrat() As String = datos.Split(",")
6         If currentPlayer = 1 Then
7
8             For i = 0 To UBound(desxifrat) - 1
9
10                Dim numero As Integer = CInt(Val(desxifrat(i))) 'Valor enter de cada
                    ↳ número de la llista desxifrat()
11
12                Dim conjunt As Tuple(Of Integer, Integer) = Valor_bidimensional(numero)
                    ↳ 'Inversa de valor_unidimensional()
13                If board(conjunt.Item1, conjunt.Item2) = 0 AndAlso Not CheckForWin(1)
                    ↳ AndAlso Not CheckForWin(-1) AndAlso Not CheckForDraw() Then 'Si es
                    ↳ detecta que un sensor nou s'activa es realitzen una sèrie
                    ↳ d'accions
14                board(conjunt.Item1, conjunt.Item2) = currentPlayer 'Assignació del
                    ↳ valor del jugador a la casella on es posiciona el sensor
                    ↳ activat
15                Dim nomCasella = "Casella" & numero
16                Dim myButton As Button = CType(Me.Controls.Find(nomCasella,
                    ↳ True).FirstOrDefault(), Button)
17                myButton.Text = "X" 'Codi per veure el signe X en el programa
                    ↳ digital
18                currentPlayer *= -1 ' canvia de jugador
19                UpdatePlayerTurnLabel()
20
21            End If
22
23        Next
24
25    End If
26 End Sub

```

5.1.4.4. IMPLEMENTACIÓ DE SENSORS

Un cop construït el tauler, el següent pas ha estat implementar sensors de presència. Un sensor infrarojos (IR) per a Arduino és una eina digital utilitzada per detectar objectes i mesurar distàncies mitjançant l'emissió i detecció de llum infraroja. Aquest tipus de sensor opera sobre el principi de la radiació infraroja, que és una forma d'energia electromagnètica amb una longitud d'ona més llarga que la llum visible però més curta que les microones. Un sensor d'infrarojos generalment consta de dos components fonamentals: un emissor i un receptor. L'emissor és un LED d'infrarojos que emet llum infraroja, mentre que el receptor és un fotodíode o fototransistor que és sensible a la llum infraroja.

Un sensor d'infrarojos (IR) per a Arduino és una eina digital utilitzada per detectar objectes i mesurar distàncies mitjançant l'emissió i detecció de llum infraroja. Aquest tipus de sensor opera sobre el principi de la radiació infraroja, que és una forma d'energia electromagnètica amb una longitud d'ona més llarga que la llum visible però més curta que les microones.

Un sensor d'infrarojos generalment consta de dos components fonamentals: un emissor i un receptor. L'emissor és un LED d'infrarojos que emet llum infraroja, mentre que el receptor és un fotodíode o fototransistor que és sensible a la llum infraroja. El funcionament d'un sensor d'infrarojos és el següent:

Emissió de Llum Infraroja: L'emissor LED d'infrarojos envia un feix de llum infraroja. Aquesta llum és invisible per a l'ull humà.

Reflexió: Quan la llum infraroja colpeja un objecte, es reflecteix en diverses direccions. Una part d'aquesta llum reflectida és capturada pel receptor del sensor.

Detecció: El receptor detecta la llum infraroja reflectida i converteix l'energia lumínica en energia elèctrica. La quantitat de llum rebuda i el temps que triga a ser detectada després de ser emesa pot oferir informació sobre la presència d'un objecte i la seva distància relativa respecte al sensor.

Processament del Senyal: El senyal elèctric generat pel receptor es processa mitjançant circuits electrònics (que poden incloure amplificació i filtratge) i després s'envia al microcontrolador Arduino per a l'anàlisi i la presa de decisions.



Tauler amb sensors



Codi Arduino (Github)

5.1.4.5. MOVIMENTS DEL BRAÇ

Per fer dels moviments del braç més senzills de determinar, hem establert posicions fixes i repetitives del braç. Els moviments més importants són els següents:

```
1  'Sèrie de moviments que segueix el braç quan acciona
2      WriteGCode("T1")
3      System.Threading.Thread.Sleep(100)
4      WriteGCode("G1 E" & 10)
5      ejex = ejex - 20
6      WriteGCode("G1 X" & ejex)
7      ejey = ejey - 32
8      WriteGCode("G1 Y" & ejey)
9      ejez = ejez + 4
10     WriteGCode("G1 Z" & ejez)
11
12     AgafaPeça(millor_jugada)
13     Executa_Tasca(millor_jugada)
14
15     Espera(4000)
16
17     Obre()
18     Executa_Tasca(millor_jugada + 12)
19
20     bloqueoinicial()
21     Espera(10000)
22     Gir(millor_jugada + 10)
23 '-----
24
25 'Agafa peça es la funcio que fa que el braç agafi la fitxa del dispensador i a més
    ↳ tornar a la posicio inicial i posteriorment a una posicion que anomenem optima
```

```

26 Private Sub AgafaPeça(jugada As Integer)
27     WriteGCode("G1 Z" & 8)
28     WriteGCode("G1 X" & -15)
29     Espera(5000)
30     Tanca()
31
32     Espera(3000)
33     bloqueoinicial()
34
35     Espera(1000)
36     WriteGCode("T1")
37     System.Threading.Thread.Sleep(100)
38     WriteGCode("G1 E" & 0)
39     Gir(jugada)
40     WriteGCode("G1 X" & -20)
41     WriteGCode("G1 Y" & -32)
42     WriteGCode("G1 Z" & 4)
43     actualizapositiones()
44 End Sub
45 'Gir és una funció que ens permet girar la base del braç, aquesta funció va ser
46 ↳ creada per uns inconvenients que vam trobar a la funció executa_tasca
47 Private Sub Gir(jugada As Integer)
48     If jugada < 10 Then
49         If jugada = 0 Or jugada = 3 Or jugada = 6 Then
50             WriteGCode("T1")
51             System.Threading.Thread.Sleep(100)
52             WriteGCode("G1 E" & 3)
53             actualizapositiones()
54
55             ElseIf jugada = 2 Or jugada = 5 Or jugada = 8 Then
56                 WriteGCode("T1")
57                 System.Threading.Thread.Sleep(100)
58                 WriteGCode("G1 E" & -4)
59                 actualizapositiones()
60             End If
61         End If
62     End Sub

```

```

60 Else
61     If jugada = 10 Or jugada = 13 Or jugada = 16 Then
62         WriteGCode("T1")
63         System.Threading.Thread.Sleep(100)
64         WriteGCode("G1 E" & -1)
65         actualizaposiciones()
66
67     ElseIf jugada = 12 Or jugada = 15 Or jugada = 18 Then
68         WriteGCode("T1")
69         System.Threading.Thread.Sleep(100)
70         WriteGCode("G1 E" & 0)
71         actualizaposiciones()
72     End If
73 End If
74 End Sub

```

5.1.4.6. RESULTAT FINAL



Video al youtube de l'accionament del braç



Visual Basic Final



5.1.5. CONCLUSIONS

Creiem que aquesta activitat en conjunt ha sigut molt profitosa i hem arribat a unes conclusions:

Sinergia interdisciplinària:

Hem après que la col·laboració interdisciplinària ens permet crear projectes amb un potencial immensament superior al de qualsevol projecte individual.

Claredat i Eficiència en la Programació:

La necessitat de que el codi estigui ben explicat: hem comprès la importància de comentar els codis, minimitzar-los al màxim possible i saber explicar-los. Aquestes habilitats han resultat claus per a l'èxit ràpid del nostre projecte.

Comprensió a través de la col·laboració:

Treballar junts ens ha permès entendre per sobre el funcionament de cada un dels projectes. Aquesta perspectiva integrada ha estat essencial per a la fusió exitosa dels nostres treballs individuals en aquest apèndix conjunt, que ens ha confirmat el potencial dels nostres treballs de recerca.

6. LLISTA DE REFERÈNCIES

6.1 BIBLIOGRAFIA

Craig JJ, Vidal Romero Elizondo A, Álvarez Bada JR. Robótica. 3a ed. México [etc: Pearson Educación; 2006.

Mercader Uguina JR. El futuro del trabajo en la era de la digitalización y la robótica. Spain: Tirant lo Blanch; 2017.

Reyes Cortés Fernando. Robótica : control de robots manipuladores. Barcelona: Marcombo; 2011.

Rigatos GG. Modelling and Control for Intelligent Industrial Systems: Adaptive Algorithms in Robotics and Industrial Engineering. Vol. 7. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

6.2. WEBGRAFIA

Fauzi Othman. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. [En línia]. Juny 2016. <<https://www.researchgate.net/profile/Kulvir-Singh/post/Could-you-please-help-me-about-History-of-industry-40-in-Malaysia/attachment/5a5d9a084cde266d58835b28/AS%3A583311556263937%401516083720944/download/industry4.0ReviewOthman.pdf>>[Consulta:16 agost 2023].

Haider A. F. Almurib , Haidar Fadhil Al-Qrimli , Nandha Kumar. A Review of Application Industrial Robotic Design. [En línia] 2011. <[A-review-of-application-industrial-robotic-design.pdf](#)>[Consulta:16 agost 2023].

World Economic Forum. *The future of jobs report*. [En línia]. 2018.<[WEF Future of Jobs 2018.pdf \(weforum.org\)](#)>[Consulta:16 agost 2023].

MATHEUS S. XAVIER, CHARBEL D. TAWK, ALI ZOLFAGHARIAN, JOSHUA PINSKIER, DAVID HOWARD 5, TAYLOR YOUNG, JIEWEN LAI 6, SIMON M. HARRISON, YUEN K. YONG, MAHDI BODAGHI AND ANDREW J. FLEMING. Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications.. [En línia]. 9 juny 2022. <[IEEE Xplore Full-Text PDF:](#)>[Consulta:22 agost 2023].

I. TRENDAFILOVA AND H. VAN BRUSSE. *NON-LINEAR DYNAMICS TOOLS FOR THE MOTION ANALYSIS AND CONDITION MONITORING OF ROBOT JOINTS*. [En línia]. 20 decembre 2000.<[00b4951a64e8c1c31f000000-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)>[Consulta:19 agost 2023].

M. Taylan Das, L. Canan Dülger. *Mathematical modelling, simulation and experimental verification of a scara robot*. [En línia]. 18 gener 2005.<[doi:10.1016/j.simpat.2004.11.004](#)>[Consulta:19 agost 2023].

Jamshed Iqbal, Raza ul Islam, and Hamza Khan . *Modeling and Analysis of a 6 DOF Robotic Arm Manipulator* . [En línia]. 6 juny 2012.<[Microsoft Word - EEE-1207-02](#)>[Consulta:19 agost 2023].

B. V. Chapnik, G. R. Heppler, and J.D. Aplevich . *Modeling Impact on a One-Link Flexible Robotic Arm*. [En línia]. agost 1991.<[Modelling-Impact-on-a-One-Link-Flexible-Robotic-Arm.pdf](#)>[Consulta:19 agost 2023].

Gabriel Ruiz Garzón. *El concepto estadístico del centro de gravedad*. [En línia].<[Ruiz2003ElNumeros53.pdf](#)>[Consulta:21 agost 2023].

Manuel Jesús Escalera Tornero Antonio José Rodríguez Fernández. ACTUADORES NEUMÁTICOS. [En línia]. <[Manuel Jesus Esacalera-Antonio Rodriguez-Actuadores Neumaticos 1-libre.pdf](#)>[Consulta:22 agost 2023].

Hazem I. Ali, Samsul Bahari B Mohd Noor, S. M. Bashi, M. H. Marhaban. A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control). [En línia]. 2009. <[document \(psu.edu\)](#)>.[Consulta:22 agost 2023].

Dan Stoianovici, Alexandru Patriciu, Doru Petrisor, Dumitru Mazilu and Louis Kavoussi. A New Type of Motor: Pneumatic Step Motor. . [En línia]. 26 abril 2011. <[A New Type of Motor: Pneumatic Step Motor - PMC \(nih.gov\)](#)>.[Consulta:22 agost 2023].

Antonio Delgado Díez. ACTUADORES HIDRÁULICOS. [En línia]. <[Microsoft Word - PORTADA \(uhu.es\)](#)>.[Consulta:23 agost 2023].

Alexandru Forrai.A robust control approach to electromagnetic act. [En línia]. 2013. <[A-robust-control-approach-to-electromagnetic-actuators.pdf \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:23 agost 2023].

Edrey D. Ruiz-Rojas, J.L. Vazquez-Gonzalez, Ruben Alejos-Palomares, Apolo Z. Escudero-Uribe, J. Rafael Mendoza-Vázquez.Mathematical Model of a Linear Electric Actuator with Prosthesis Applications. [En línia]. 2008. <[Mathematical Model of a Linear Electric Actuator with Prosthesis Applications \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:24 agost 2023].

Abhijeet Redekar, Dipankar Deband Stepan Ozana. Functionality Analysis of Electric Actuators in Renewable Energy Systems—A Review [En línia]. 3 juny 2022. <[bing.com/ck/a?!&&p=fb4826e1c31d2bd2JmltdHM9MTY5MjkyMTYwMCZpZ3VpZD0wZDU0OTYyNi1hYzFjLTlTY2ZDQtdMDk5Yi04NTA2YTgxYzY0ZmYmaW5zaWQ9NTE5MA&ptn=3&shh=3&fclid=0d549626-ac1c-66d4-099b-8506a81c64ff&psq=electric+actuator+article&u=a1aHR0cHM6Ly9tZHBpLXJlcy5jb20vZGF9hdHRhY2htZW50L3NlbnNvcnMvc2Vuc29ycy0yMi0wNDI3My9hcnRpY2xiX2RlcGxveS9zZW5z b3JzLTlYLTlTA0Mjc2LXYyLnBkZj92ZXJzaW9uPTE2NTQ1ODE1NzE&ntb=1](#)>.[Consulta:25 agost 2023].

Yaguo Lei, Jing Lin, Ming J. Zuo, Zhengjia He. Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review. [En línia]. 21 novembre 2013. <[Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:26 agost 2023].

Y.J.S. Harrison. Piezoelectric Polymers [En línia]. desembre 2001. <[20020044745.pdf \(nasa.gov\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

Ioana Ionică, Mircea Modreanu, Alexandru Morega, Cristian Boboc. Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor. [En línia]. 25 març 2017. <[untitled \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

Matthew Grant. Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor. [En línia]. juny 2005. <[AN2974, Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor - Application Notes \(patarnott.com\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

Dr. Douglas W. Jones. Stepping Motors Fundamentals. [En línia]. 2004. <[Stepping Motors Fundamentals \(bristolwatch.com\)](#)>.[Consulta:27 agost 2023].

Arturo Pérez París. RELÉS ELECTROMAGNÉTICOS Y ELECTRÓNICOS. PARTE II: INTERRUPTOR ELECTRÓNICO. [En línia]. desembre 2010. <[https://www.vivatacademia.net/index.php/vivat/article/view/371](#)>.[Consulta:28 agost 2023].

Rafael Enríquez Herrador. Guía de Usuario de Arduino. [En línia]. 13 novembre 2009. <[Arduino user manual es.pdf \(uco.es\)](#)>.[Consulta:29 agost 2023].

Paul E. Gronowski, Member, IEEE, William J. Bowhill, Member, IEEE, Ronald P. Preston, Member, IEEE, Michael K. Gowan, and Randy L. Allmon, Associate Member, IEEE. High-Performance Microprocessor Design. [En línia]. 5 maig 1998. <[High-performance microprocessor design \(iczhiku.com\)](#)>.[Consulta:29 agost 2023].

Steven D. Johnson. Field Programmable Gate Array. [En línia]. 11 novembre 2004. <[fpga.pdf \(indiana.edu\)](#)>.[Consulta:29 agost 2023].

Ioannis Stefanakos, Radu Calinescu, James Douthwaite, Jonathan Aitken, and James Law. Safety Controller Synthesis for a Mobile Manufacturing Cobot. [En línia]. 30 setembre 2022. <[Safety Controller Synthesis for a Mobile Manufacturing Cobot \(whiterose.ac.uk\)](#)>.[Consulta:29 agost 2023].

Electrocomponentes SA.Fuentes de alimentación. [En línia].<[Microsoft PowerPoint - Fuentes de alimentacion.ppt \(sase.com.ar\)](#)>.[Consulta:30 agost 2023].

Morteza Shariatee, Alireza Akbarzadeh, Ali Mousavi, and Salman Alimardani.Design of an Economical SCARA Robot for Industrial Applications. [En línia]. 2014. <[untitled \(psu.edu\)](#)>.[Consulta:30 agost 2023].

Morteza Shariatee, Alireza Akbarzadeh, Ali Mousavi, and Salman Alimardani.Design of an Economical SCARA Robot for Industrial Applications. [En línia]. 2014. <[untitled \(psu.edu\)](#)>.[Consulta:30 agost 2023].

Luis del Valle Hernández. Escoger el mejor sensor de temperatura para Arduino. [En línia]. 26 juny 2019.. <[https://www.bolanosdj.com.ar/MOVI/ARDUINO2/SensoresTemArdui.pdf](#)>.[Consulta:3 setembre 2023].

Tadeusz Mikolajczyk. Manufacturing Using Robot. [En línia]. 10 febrer 2012. <[Manufacturing-Using-Robot.pdf \(researchgate.net\)](#)>.[Consulta:8 setembre 2023].

Madileth Yolanda Chancay Merchán, María Magdalena Tóala Zambrano, María Mercedes Ortiz Hernández, Edwin Antonio Mero Lino. La robótica y sus avances en la medicina. [En línia]. 2022. <[https://revistas.unesum.edu.ec/JTI/index.php/JTI/article/view/8](#)>.[Consulta:6 setembre 2023].

Ministerio de Sanidad, Generalitat de Catalunya, Salut/, Agència de Qualitat i Avaluació Sanitàries de Catalunya, Red Española De Agencias De Evaluación. Eficacia, efectividad, seguridad y eficiencia de la cirugía robótica con el sistema quirúrgico Da Vinci. [En línia]. <[Eficacia, efectividad, seguridad y eficiencia de la cirugía robótica con el sistema quirúrgico Da Vinci. Aplicada a la obesidad \(cirugía bariátrica\), cáncer prostático y cáncer colorrectal \(gencat.cat\)](#)>.[Consulta:6 setembre 2023].

Lisandr oPuglisi y Héctor Moreno.Prótesis robóticas. [En línia]. <[Protesis roboticas-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)>.[Consulta:6 setembre 2023].

Cobots: Robots for collaboration with people. [En línia]. <[Cobot - collaborative robot \(northwestern.edu\)](#)>.[Consulta:7 setembre 2023].

Rogelio Delgado. Herramientas finales en robótica industrial. [En línia]. 15 octubre 2018. <[En robotica industrial conocer distintas herramientas finales disponibles \(inesem.es\)](#)>.[Consulta:10 setembre 2023].

Juan Ignacio Medrano Trujillo. Brazo robot de bajo coste con motores paso a paso que escribe. [En línea]. 2020. <[https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/94547/TFG-2757-MEDRANO%20TRUJILLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)>.[Consulta: 6 novembre 2023].

6.3. ICONOGRAFIA

Il·lustració 2: Erik Heinrich. 10 jobs of the future you need to know about right now. [En línia]. 29 desembre 2017. <<https://macleans.ca/work/jobs/10-jobs-of-the-future-you-need-to-know-about-right-now/>>.[Consulta: 9 novembre 2023].

Il·lustració 3: Dirección de Educación Técnica. MORFOLOGÍA BÁSICA DE UN ROBOT INDUSTRIAL. [En línia]. 2020. <<https://continuemosestudiando.abc.gob.ar/wp-content/uploads/2023/02/cuadernillo-de-actividades-6ta-entrega-morfologia-basica-de-un-robot-industrial-educacion-tecnica-continuemos-estudiando.pdf>>.[Consulta: 9 novembre 2023].

Il·lustració 4: ibídem.

Il·lustració 5: ibídem.

Il·lustració 6: ibídem.

Il·lustració 7: ibídem.

Il·lustració 8: Jesús Barranco Ortega. Cilindros Neumáticos. [En línia]. agost 2014. <https://jesusbarrancoortega109mk2013b.blogspot.com/2014_07_01_archive.html>.[Consulta: 9 novembre 2023].

Il·lustració 9: ibídem.

il·lustració 10: Rodavigo. ACTUADOR DE GIRO TIPO PALETA SERIE CRB1BW REF. SMC CRB1BW100-90S-XF. [En línia]. <<https://rodavigo.net/es/p/actuador-de-giro-tipo-paleta-serie-crb1bw-ref-smc-crb1bw100-90s-xf/161CRB1BW10090SXF>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

il·lustració 11: Diet industry. Motor neumático con paleta. [En línia]. <<https://www.directindustry.es/prod/gast/product-7063-806213.html>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

il·lustració 12: Mechanics Tips. Planetary Gearbox. <<https://mechanicstips.blogspot.com/2016/05/planetary-gearbox.html>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

il·lustració 13: Matthew Grant. Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor. [En línia]. juny 2005. <<https://patarnott.com/atms748/pdf/Class2018/AN2974.pdf>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 14: Electrical Academia. Stepper Motor Types and Working. [En línia]. <<https://electricalacademia.com/synchronous-machines/stepper-motor-types-working/>>.[Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 15: ibídem.

Il·lustració 16: ibídem.

Il·lustració 17: ibídem.

Il·lustració 18: Pi Supply. Arduino Uno R3 (Atmega328 - assembled). [En línia]. <<https://uk.pi-supply.com/products/arduino-uno-r3-atmega328-assembled>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 19: Arduino France. L'IDE Arduino: Installation et utilisation. [En línia]. <<https://www.arduino-france.com/tutoriels/ide-arduino-installation-et-utilisation/>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 20: Ingeniería Mecafenix, La enciclopedia de la ingeniería. [En línia]. <<https://www.ingmecafenix.com/category/electronica/componentes/>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 21: BCN3D. BCN3D MOVEO – Un brazo robótico de código abierto impreso en 3D. [En línia]. 28 juliol 2016. <<https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-moveo-un-brazo-robotico-de-codigo-abierto-impreso-en-3d/>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 22: XIN-JUN LIU, JINSONG WANG, KUN-KU OH and JONGWON KIM. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. [En línia]. 21 octubre 2003. <[A new approach to the design of a delta robot with desired workspace - artigo-libre.pdf \(d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net\)](#)>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 23: Kuka. Scara Robots. [En línia]. <<https://www.kuka.com/en-de/products>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 24: AMS Lab. Robots cartesianos. [En línia]. <<https://www.ams-latam.com/es/robots-cartesianos/>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 25: Tecneu. Sensor De Fuerza Resistivo Circular 6 FSR402. [En línia]. <<https://www.tecneu.com/collections/presion/products/sensor-de-fuerza-resistivo-circular-6>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 26: Shelly España. Sensor ultrasónico HC-SR04. [En línia]. <https://www.shellyespana.com/sensor-ultrasonico-hc-sr04/?utm_source=Google%20Shopping&utm_campaign=Feed&utm_medium=cpc&utm_term=302095&qclid=CjwKCAiAxreqBhAxEiwAfGfndLLUIIQH4WK_YLtfKBLcBJuHFOOijtmgwqHA95E4hHU9QXksbX6jqChoCqeQQA vD_BwE>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 27: Direct Industry. Sensor de visión de reconocimiento óptico de caracteres IV series. [En línia]. <<https://www.directindustry.es/prod/keyence/product-64178-742943.html>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 28: Ingeniería Mecafenix, La enciclopedia de la ingeniería. [En línia]. <<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-inercial/>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 29: Amazon. AZDelivery KY-015 Módulo del Sensor de Temperatura DHT11 Compatible con Arduino con E-Book Incluido. [En línia]. <<https://www.amazon.es/AZDelivery-KY-015-M%C3%B3dulo-temperatura-incluido/dp/B089W8DB5P?th=1>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 30: Rodrigo Pareja. Seat Martorell reduce la producción del León por el coronavirus. [En línia]. 12 març 2020. <<https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a31421870/coronavirus-fabricacion-seat-leon/>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 31: Dr. Alvarez Castelo. Robot quirúrgico Da Vinci. [En línia]. <<http://xn--urologocorua-khb.com/robot/davinci-coruna.html>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 32: Kuka. Kuka Robots. [En línia]. <<https://www.kuka.com/en-de/products>>. [Consulta: 10 novembre 2023].

Il·lustració 33: fotografia pròpia

Il·lustració 34: Harvey Lipkin. A NOTE ON DENAVIT-HARTENBERG NOTATION IN ROBOTICS. [En línia]. <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9d43a3c58a1e277ba25db339a118b418889e54de>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 35: Last Minute Engineers. Control 28BYJ-48 Stepper Motor with ULN2003 Driver & Arduino. [En línia] <<https://lastminuteengineers.com/28byj48-stepper-motor-arduino-tutorial/>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 36: Amazon. Longrunner Motore passo passo Nema 17 Stepper Motor 3D Printer CNC Kit with ArduinoIDE A4988 Endstop GRBL CNC Shield Board RAMPS 1.4 Mechanical Switch DRV8825 Driver LKB02. [En línia]. <<https://www.amazon.it/Longrunner-Stepper-ArduinoIDE-Mechanical-LKB02/dp/B072N4FMRN>>. [Consulta: 18 desembre 2023].

Il·lustració 37: Josef Prusa. Pronterface y cable USB. [En línia]. Agost 2023.

<https://help.prusa3d.com/es/article/pronterface-y-cable-usb_2222>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 38: Makerguides. Tutorial de TB6560 Stepper Motor Driver con Arduino. [En línia]. <<https://www.makerguides.com/es/tb6560-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 39: fotografia pròpia.

Il·lustració 40: fotografia pròpia.

Il·lustració 41: fotografia pròpia.

Il·lustració 42: fotografia pròpia.

Il·lustració 43: MARLIN P. JONES & Assoc., INC. 31306-MS Optocouplers 3A FULL BRIDGE STEPMOTOR DRIVER. <<https://www.mpja.com/download/31306ms.pdf>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 44: Amazon. Kit de impresora 3D, controlador RAMPS 1.4 de impresora 3D + MEGA 2560 R3 + A4988 con kit de puente de cable USB de disipador térmico, paquete pequeño, bajo costo. [En línia]. <<https://p-yo-www-amazon-es-kalias.amazon.es/impresora-controlador-disipador-t%C3%A9rmico-paquete/dp/B08BZPF6TD>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 45: RoboticX. RAMPS 1.4 3D PRINTER OR CNC BOARD. [En línia]. <<https://roboticx.ps/product/ramps-1-4-3d-printer-or-cnc-board/>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 46: Proyecto Arduino. Arduino Mega 2560. [En línia]. <<https://proyectoarduino.com/arduino-mega-2560/>>. [Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 47: fotografia pròpia.

Il·lustració 48: fotografia pròpia.

Il·lustració 49: Bcn3d Technologies. User Manual BCN3D Moveo.pdf. [En línia]. <<https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo/blob/master/USER%20MANUAL/User%20Manual%20BCN3D%20Moveo.pdf>>.

[Consulta: 12 desembre 2023].

Il·lustració 50: Ultimaker. Ultimaker S5. [En línia]. <<https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s5/>>. [Consulta: 18 desembre 2023].

Il·lustració 51: fotografia pròpia.

Il·lustració 52: fotografia pròpia.

Il·lustració 53: fotografia pròpia.

Il·lustració 54: fotografia pròpia.

Il·lustració 55: fotografia pròpia.

Il·lustració 56: fotografia pròpia.

Il·lustració 57: fotografia pròpia.

Il·lustració 58: fotografia pròpia.

Il·lustració 59: fotografia pròpia.

Il·lustració 60: fotografia pròpia.

Il·lustració 61: fotografia pròpia.

Il·lustració 62: fotografia pròpia.

Il·lustració 63: fotografia pròpia.

Il·lustració 64: fotografia pròpia.

Il·lustració 65: fotografia pròpia.

7. ANNEXOS - GITHUB

ANNEX 1: FITXERS STL DEL BRAÇ:



ANNEX 2: MANUAL DE L'USUARI PER MUNTAR EL BRAÇ:



ANNEX 3: FIRMWARE MARLIN CONFIGURAT



